

Rafael Gonçalves de Souza

**ESTUDO DA RETIFICAÇÃO COM PONTA ÚNICA DE GRÊS
PORCELANATO NO REGIME FRÁGIL**

Tese submetida ao Programa de
Pós Graduação em Ciência e
Engenharia de Materiais da
Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau
de Doutor em Ciência e Engenharia
de Materiais

Orientador: Prof. Orestes Estevam
Alarcon, Dr. Eng.

Co-orientador: Prof. Márcio Celso
Fredel, Dr.-Ing.

Florianópolis
2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Gonçalves de Souza, Rafael

ESTUDO DA RETIFICAÇÃO COM PONTA ÚNICA DE GRÊS
PORCELANATO NO REGIME FRÁGIL / Rafael Gonçalves de Souza ;
orientador, Orestes Estevam Alarcon ; co-orientador,
Márcio Celso Fredel. - Florianópolis, SC, 2013.
155 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais.

Inclui referências

1. Ciência e Engenharia de Materiais. 2. Polimento de
porcelanato. 3. Usinagem frágil. 4. Retificação com ponta
única. 5. Esclerometria. I. Alarcon, Orestes Estevam. II.
Fredel, Márcio Celso. III. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia
de Materiais. IV. Título.

Rafael Gonçalves de Souza

ESTUDO DA RETIFICAÇÃO COM PONTA ÚNICA DE GRÊS PORCELANATO NO REGIME FRÁGIL

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de “Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

Florianópolis, 15 de agosto de 2013.

Prof. Antonio P. Novaes de Oliveira, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Orestes E. Alarcon, Dr. Eng.
Orientador
Universidade Federal de Santa
Catarina

Prof. Márcio C. Fredel, Dr.-Ing.
Co-orientador
Universidade Federal de Santa
Catarina

Prof. Rodrigo L. Stoeterau,
Dr. Eng.
Universidade de São Paulo

Prof. José O. A. Paschoal,
Dr.-Ing.
Instituto Inova

Prof. Carlos R. Rambo, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa
Catarina

Prof. Rolf B. Schroeter, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa
Catarina

Prof. Hazim A. Al-Qureshi Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico a todos aqueles,
que de alguma forma,
e ao seu modo,
ajudaram neste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Jurandir J. de Souza e Rosane G. de Souza, pelo esforço e dedicação a fim de me darem uma ótima educação e por todo o suporte dado durante toda minha vida. A minha esposa Sara Nunes, por sua tranquilidade nos momentos difíceis. E a todos os meus familiares e amigos pelo apoio e incentivo.

Aos professores Orestes E. Alarcon e Márcio C. Fredel por sua orientação, incentivo e por acreditar em minha capacidade.

Aos vários amigos do CERMAT e demais laboratórios da UFSC: Lorencio Neckel, Ana Casadei, André Prette, Tatiane Eufrásio, Lucas Berti, Rafael Pereira, Ramon, David, Guilherme, Catia, Ahryman, Giovana. Também aos alunos do USICOM e LMP, e em particular aos professores Walter L. Weingaertner e Rolf B. Schroeter pelas valiosas dicas e sugestões.

Ao professor Fabio J. P. Sousa, que durante o período de doutorado sanduíche, pelos seus esclarecimentos, apoio e colaboração para minha ida a TU-KL.

A todo o pessoal da TU-KL/FBK, Ingo, Manfred, Felix, Patrick, Marco, Marina, Lutzke, Phillip, Holger, Rosemerie e Seher, pela ajuda e colaboração durante o meu período de estágio. Em especial ao amigo Anatolij Olenburg, por toda a solidariedade, confiança e ajuda dentro e fora do ambiente de trabalho.

A toda a equipe da TU-HH, principalmente a aluna de doutorado Paula Guglielmi pelo auxílio nos ensaios de caracterização.

Aos amigos de turmas da pós-graduação, pelo apoio e estímulo no decorrer de cada trimestre.

A CAPES e CNPq pela concessão de bolsas doutorado e doutorado sanduíche via programa BRAGECRIM, apresentado em maior detalhe no APÊNDICE A.

À UFSC, através do PGMAT, pelo suporte logístico para a execução dos trabalhos.

Enfim, a todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

RESUMO

O emprego de revestimento cerâmico do tipo porcelanato polido alto brilho tem se tornado cada dia mais comum na construção civil. Um dos principais fatores que determinam essa escolha é o grande apelo estético decorrente do alto brilho, ocupando o nicho de mercado anteriormente dominado por pedras naturais, como mármore e granito, por exemplo. O processo de usinagem para obtenção do porcelanato alto brilho é dividido em várias etapas diferentes, sendo a primeira delas a retificação plana de mergulho para desbaste e remoção dos defeitos de ortogonalidade da face superior da placa cerâmica. Comumente, os parâmetros utilizados neste processo são definidos diretamente na linha industrial por “tentativa e erro”, dependendo fortemente da experiência e sensibilidade do operador para ajuste do maquinário. Como consequência deste procedimento empírico, podem ocorrer vários problemas que aumentam os custos de produção e prejudicam o resultado final de brilho no produto. Assim esta tese de doutorado pretende aprimorar o conhecimento de tribologia e cinemática, otimizando o processo de retificação frágil para porcelanato. É considerado neste trabalho a interação física entre o grão abrasivo e a superfície da placa cerâmica, bem como a cinemática descrita por este na superfície da peça. Como forma de simular o efeito tribológico durante a usinagem, foram realizados ensaios por retificação plana de mergulho e esclerometria, utilizando ferramenta abrasiva com apenas um grão de diamante e indentador Vickers, respectivamente. Os resultados obtidos foram analisados via microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e perfilometria óptica. Em avaliação teórica, as equações propostas em literatura para remoção de material por usinagem frágil a partir das características básicas da cerâmica em trabalho foram comparadas aos resultados experimentais obtidos, a fim de validar sua representatividade. Ao fim, com as conclusões obtidas neste trabalho, são propostas adaptações para melhoria das modelagens matemáticas, bem como condições de processo que otimizem a etapa de retificação frágil de porcelanato, buscando um equilíbrio entre o estado da arte e a viabilidade econômica do processo.

Palavras-chave: Polimento de porcelanato. Usinagem frágil. Retificação com ponta única. Esclerometria.

ABSTRACT

The use of polished high gloss porcelain tile has become increasingly common in civil construction. One of the main factors that determine this choice is the great aesthetic call due to the high gloss, occupying the niche market previously dominated by natural stones, such as marble or granite, for example. The machining process to obtain that high gloss can be divided into several distinct stages, the first one is the flat grinding for roughing and removal of orthogonal defects from the top surface of ceramic plate. Commonly, the process parameters used into grinding are obtained directly on industrial line by "trial and error", depending strongly on the operator's experience and sensitivity to adjust the machinery. As a result of this empirical procedure, there are several problems that increase the cost of production and may injure the final gloss of the product. So this doctoral thesis aims to increase the knowledge of tribology and kinematics, optimizing the fragile grinding process for porcelain tile. It is considered in this study the physical interaction between the abrasive grain and the surface of the ceramic plate, as well the kinematic described by this one on the work piece. As a way to simulate the tribological effect during machining, tests were performed employing a surface grinding machine and sclerometry, using an abrasive well with a single diamond abrasive grain and a Vickers indenter as abrasive tool, respectively. The results were analyzed by optical microscopy, scanning electron microscopy and optical perfilometry. In theoretical evaluation, the equations proposed in the literature for material removal by fragile scratching based on the basic characteristics of ceramic were compared to the experimental results obtained, in order to validate their representativeness. At the end, based on the conclusions presented in this work, adaptations are proposed to improve the mathematical modelling, as well process conditions are pointed to optimize the fragile grinding step for high gloss porcelain tiles, seeking a balance between the state of art and the economic viability of the process.

Keywords: Polished ceramic tiles. Brittle machining. Single point grinding. Sclerometry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Produção de revestimento cerâmico no Brasil.....	34
Figura 2: Principais produtores mundiais de revestimento cerâmico....	34
Figura 3: Produção brasileira por tipo de produto.....	37
Figura 4: a) Modelos de rebolos diamantados com perfil de corte espiralar; b) Disposição do rebolo e sentido de movimento da placa cerâmica.	41
Figura 5: a) Modelos de rebolos diamantados com perfil de corte espiralar e liso; b) Modelo de funcionamento para placa cerâmica com largura maior que diâmetro nominal da árvore.	41
Figura 6: Defeitos de ortogonalidade em placas cerâmicas pós queima: a) curvatura central; b) curvatura lateral; c) empenamento	42
Figura 7: “Sombras de polimento” devido ao favorecimento geométrico promovido pela geometria da cabeça de brunimento sem oscilação lateral.....	43
Figura 8: a) Diferentes tipos de pedras utilizadas no brunimento de porcelanato; b) Árvore de brunimento com 6 pedras acopladas à árvore efetuando oscilação lateral	44
Figura 9: Esquema simplificado das etapas de usinagem para revestimento cerâmico alto brilho.	45
Figura 10: Esquema representativo para usinagem por geometria não definida por retificação.....	46
Figura 11: Esquema representativo para trajetória do grão abrasivo durante a retificação.	46
Figura 12: Regiões de deformação durante a formação de cavaco.	47
Figura 13: Distribuição e transformação da energia durante a retificação.....	50
Figura 14: Dependência entre a espessura de usinagem e as variáveis de entrada e as condições de contato.....	51
Figura 15: Representação esquemática do rebolo abrasivo.....	53
Figura 16: Dureza Knoop (HK) para diferentes materiais utilizados como grãos abrasivos.	54
Figura 17: Tipos de mecanismo para desgaste abrasivo: a) microsulcamento; b) microcorte; c) microlascamento.	56
Figura 18: Etapas da remoção de material por indentação em materiais frágeis.....	57
Figura 19: a) Trincas laterais maiores que trincas radiais; b) Trincas laterais menores que trincas radiais.....	59
Figura 20: Modelo do mecanismo de abrasão na superfície de um material frágil.	60

Figura 21: Esquema simplificado da rugosidade e sistema de trincas residuais após retificação em materiais frágeis.....	62
Figura 22: a) Indentador com ponta cônica de 50 μm e carga de 12 N, trincas medianas e laterais; b) retificação plana, trincas por fratura intergranular; c) retificação plana, trincas laterais, com presenças de porosidade; d) retificação plana, trinca mediana.....	63
Figura 23: Relação entre direção de usinagem e o tipo de trinca solicitada em força trativa.	65
Figura 24: Tipos e severidade dos defeitos para materiais cerâmicos. .	65
Figura 25: Amostra para caracterização do módulo de elasticidade (E) e tenacidade à fratura (K _{IC}).	69
Figura 26: Esquema representativo do entalhe para caracterização de tenacidade a fratura.	70
Figura 27: a) Corpo de prova para caracterização do módulo de elasticidade; b) Corpo de prova com entalhe grosseiro e face polida para caracterização de tenacidade a fratura.....	71
Figura 28: Detalhe da amostra colada ao porta amostra para início do trabalho de usinagem do entalhe fino.....	72
Figura 29: a) Amostra para ensaio em retificadora, com base metálica para encaixe no porta amostra magnético; b) detalhe do porta amostra com suporte magnético.	73
Figura 30: Montagem experimental do rebolo do ensaio de riscamento em retificadora plana, com visão detalhada da ferramenta de usinagem definida com grão de diamante fixado na aresta.	74
Figura 31: Microfotografia do grão abrasivo de diamante: a) 100 μm de diâmetro médio; b) 200 μm de diâmetro médio. Escala de cores em μm	74
Figura 32: Visão geral da montagem da guia de elementos rolantes sob o rebolo de retificação.....	75
Figura 33: a) Visão geral do esclerômetro desenvolvido no FBK/TU-KL; b) Detalhe do porta amostra com o sensor triaxial para medição de força e pinça para suporte da ferramenta.	77
Figura 34: Esquema exemplificando posicionamento da aresta de corte para o ensaio de riscamento.	77
Figura 35: Configuração esquemática demonstrando sequência adotada para riscamento cruzado.....	79
Figura 36: Configuração esquemática mostrando sequência de riscamento paralelo: a) configuração 1D-3D-2D; b) configuração 1D-3D-2E; c) configuração 1D-3E-2D.	80
Figura 37: Esquema representando método de cálculo da área transversal afetada em função do passo de medição e profundidade medida.....	82

Figura 38: a) Microfotografia de amostra com riscamento simples; b) Análise digital de imagem com marcação em verde da área não trabalhada (A_{NT}) pelo riscamento.....	83
Figura 39: Representação esquemática para cálculo da área trabalhada em riscamento cruzado teórica (A_{Tct}), indicando área a ser descontada no somatório.....	84
Figura 40: Diagrama de Weibull.....	87
Figura 41: Dureza Vickers em função da carga aplicada.....	88
Figura 42: a) Imagem por microscopia óptica do riscamento em retificadora plana b) identificação digital de área não trabalhada.....	90
Figura 43: Largura média do risco em função da velocidade de riscamento e diâmetro médio do grão abrasivo.....	90
Figura 44: Esquema representativo para área de contato dos grãos abrasivos com diferentes diâmetros.....	91
Figura 45: Profundidade de riscamento em função da velocidade de riscamento e diâmetro médio do grão abrasivo.....	92
Figura 46: Área transversal afetada em função da velocidade de riscamento e diâmetro médio do grão abrasivo.....	93
Figura 47: Imagem por microscopia eletrônica de varredura da superfície da amostra de porcelanato com riscamento por retificação plana. Setas brancas indicando trincas laterais, com provável afloramento a superfície. Configuração de ensaio: grão abrasivo de 100 μm de diâmetro médio, velocidade de corte de 15 m/s e profundidade de mergulho de 10 μm	94
Figura 48: Imagem por microscopia eletrônica de varredura da superfície da amostra de porcelanato com riscamento por retificação plana. Arco negro mostrando início do risco com pequena parcela de deformação plástica. Configuração de ensaio, grão abrasivo de 100 μm de diâmetro médio, velocidade de corte de 20 m/s e profundidade de mergulho de 10 μm	96
Figura 49: Imagem por microscopia eletrônica de varredura da superfície da amostra de porcelanato com riscamento por retificação plana. Em detalhe, zona de deformação plástica. Configuração de ensaio: grão abrasivo de 100 μm de diâmetro médio, velocidade de corte de 20 m/s e profundidade de mergulho de 10 μm	97
Figura 50: Imagem por microscopia eletrônica de varredura da superfície da amostra de porcelanato com riscamento por retificação plana. Seta branca indicando aderência de material da ferramenta de corte na superfície do corpo de prova. Configuração de ensaio: grão abrasivo de 200 μm de diâmetro médio, velocidade de corte de 20 m/s e profundidade de mergulho de 10 μm	98

Figura 51: Imagem por microscopia eletrônica de varredura da superfície da amostra de porcelanato com riscamento por retificação plana. Em detalhe, aderência de material da ferramenta de corte na superfície do corpo de prova. Configuração de ensaio: grão abrasivo de 200 μm de diâmetro média, velocidade de corte de 20 m/s e profundidade de mergulho de 10 μm .	99
Figura 52: a) Imagem por microscopia óptica do para riscamento cruzado com 30°, b) identificação digital de área não trabalhada para riscamento cruzado com 30°. Ambas as figuras com seta indicativa de ilhas de área não trabalhadas.	100
Figura 53: Remoção adicional de material em função do ângulo de cruzamento na usinagem frágil de placa cerâmica do tipo porcelanato.	101
Figura 54: Esquema representativo para forma de contato da ferramenta de usinagem em função do ângulo de cruzamento. Região em vermelho explicitando a área de contato.	102
Figura 55: Comparação entre pares de ângulos concordantes e discordantes em função da remoção adicional de material.	103
Figura 56: Indentador Rockwell C fraturado após ensaio de riscamento frágil. Setas indicando ponta fraturada.	104
Figura 57: Imagem por microscopia óptica e identificação digital de área não trabalhada em riscamento paralelo, com seta indicativa de ilhas não trabalhadas; a) e b) 1D-3D-2E espaçamento 0,8L _R ; c) e d) 1D-3D-2E espaçamento 1,2L _R .	105
Figura 58: Remoção adicional de material em função do sentido de riscamento e espaçamento para riscos paralelos.	106
Figura 59: Perfil da profundidade do riscamento com um único risco empregando esclerômetro.	108
Figura 60: Área transversal afetada em função do sentido de riscamento e espaçamento para riscos paralelos.	110
Figura 61: Gráfico de força para o riscamento simples.	111
Figura 62: Imagem por microscopia óptica da superfície da amostra de porcelanato. Porosidade superficial visíveis na forma de pontos escuros.	113
Figura 63: Imagem por microscopia eletrônica de varredura da superfície da amostra de porcelanato com riscamento simples. Partículas de quartzo visíveis na forma de pontos claros.	113
Figura 64: Imagem por microscopia eletrônica de varredura da superfície da amostra de porcelanato com riscamento simples. Partículas de quartzo visíveis na forma de pontos claros, com riscos remanescentes da usinagem industrial.	114

Figura 65: Gráfico de força para o riscamento cruzado com 15°	115
Figura 66: Gráfico de atrito aparente do risco R3 em função do espaçamento entre riscos.....	116
Figura 67: Imagem por microscopia eletrônica de varredura da superfície da amostra de porcelanato com riscamento simples.....	117
Figura 68: Imagem por microscopia eletrônica de varredura da superfície da amostra de porcelanato com riscamento simples. Setas brancas indicando formação de trincas laterais e radiais com afloramento à superfície.	118
Figura 69: Imagem por microscopia eletrônica de varredura da superfície da amostra de porcelanato com riscamento cruzado de 165° . Setas brancas indicando zonas com pequena deformação plástica.....	119
Figura 70: Imagem por microscopia eletrônica de varredura da superfície da amostra de porcelanato com riscamento cruzado de 45° . Setas brancas indicando zonas com pequena deformação plástica.	120
Figura 71: Imagem por microscopia eletrônica de varredura da superfície da amostra de porcelanato com riscamento paralelo, configuração 1D-3E-2D, espaçamento entre riscos de $1,2L_R$. Seta branca indicando zona com deformação plástica. Elipses tracejadas indicando ilhas de área não trabalhada.	121
Figura 72: Imagem por microscopia eletrônica de varredura da superfície da amostra de porcelanato com riscamento paralelo, configuração 1D-3E-2D, espaçamento entre riscos de $1,2L_R$. Arcos brancos mostrando a formação de trincas cônicas, com setas brancas indicando o sentido de usinagem.	122
Figura 73: Constante de proporcionalidade a_3 em função do espaçamento entre riscos para as diferentes configurações de riscamento paralelo.....	123
Figura 74: Constante de proporcionalidade a_4 em função do espaçamento entre riscos para as diferentes configurações de riscamento paralelo.....	124
Figura 75: Tela principal do programa Polibem.....	142
Figura 76: Comparação entre medidas de brilho reais e dados simulados, incluindo o efeito de bandejamento.....	143

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classificação de revestimentos cerâmicos segundo o grau de absorção de água e correspondente aplicações residenciais.....	35
Quadro 2: Configurações de sentido empregadas no riscamento paralelo.....	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\%_p$ – percentual de porosidade da placa cerâmica
 μm – micrometro
2r – Largura do entalhe grosseiro
A – Amplitude de oscilação lateral
A – Área aparente de contato
a – Profundidade total do entalhe
 a_1 – Constante experimental
 a_2 – Constante experimental
 a_3 – Constante experimental
 a_4 – Constante experimental
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
 a_c – Profundidade de corte
ANFACER – Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimento
 A_{NT} – Área Não Trabalhada
 A_t – Área Transversal afetada
 A_{Tb} – Área Trabalhada
 A_{Tc} – Área Trabalhada em riscamento Cruzado
 A_{Tct} – Área Trabalhada em riscamento Cruzado Teórica
 A_{Tp} – Área Trabalhada em riscamento Paralelo
 A_{Tpt} – Área Trabalhada em riscamento Paralelo Teórica
 A_{Tr} – Área Trabalhada em riscamento com Retífica
 A_{Tt} – Área Total
 b – Distância da trinca até a superfície
BRAGECRIM – *Brazilian-German Collaborative Research Initiative on Manufacturing Technology*
 c – Distância da ponta da trinca até o sulco
CAPEs – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBN – Nitreto de Boro Cúbico
CERMAT – Núcleo de Estudo em Materiais Cerâmicos e Vítreos
CNC – *Computerized Numerical Control* (Controle Numérico Computadorizado)
CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CNTp – Condições Normais de Temperatura e Pressão
 C_{stat} – Distribuição estatística de grãos no rebolo
 d – Dimensão das partículas de abrasivo
 D_a – Densidade aparente
DFG – *Deutsche Forschungsgemeinschaft*
DIN – *Deutsches Institut für Normung* (Instituto Alemão para Normatização)

D_r – Densidade real
 d_{se} – Diâmetro equivalente do rebolo
 d_w – Diâmetro da peça de trabalho
 E – Módulo de elasticidade
 e – Profundidade do entalhe fino
 f – Frequência da oscilação lateral
 FBK – *Fertigungstechnik und Betriebsorganisation*
 $FINEP$ – Financiadora de Estudos e Projetos
 F_{ns} – Componente da força no sentido normal a peça
 F_t – Força tangencial
 F_{ts} – Componente da força no sentido do corte
 $G.U.$ – *Gloss Units*
 h – Espessura da amostra
 h_{cu} – Espessura média do cavaco não deformado
 HK – Dureza Knoop
 HV – Dureza Vickers
 K_{Ic} – Tenacidade a fratura
 L_H – Largura Horizontal
 L_R – Largura do Risco
 L_V – Largura Vertical
 MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
 N – Newton
 NBR – Norma Brasileira
 PIB – Produto Interno Bruto
 Q – Quantidade de massa perdida
 r – Distancia radial
 r – Raio do rebolo abrasivo
 Ra – Rugosidade média
 rpm – Rotações por minuto
 SiC – Carbetto de silício
 t – Tempo de retificação
 $TU-HH/AC$ – *Institute of Advanced Ceramics / Technische Universität Hamburg-Harburg*
 $TU-KL$ – *Technische Universität Kaiserslautern*
 V – Velocidade de avanço da esteira
 v_s – Velocidade periférica do rebolo
 v_w – Velocidade tangencial da peça
 W – Carga aplicada
 w – Rotação da partícula abrasiva no corpo do rebolo
 WKK – *Lehrstuhl für Werkstoffkunde*
 $\rho.s$ – Raio do gume de corte

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	29
1.1 OBJETIVO GERAL.....	30
1.1.1 Objetivos Específicos.....	30
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	33
2.1 CERÂMICA DE REVESTIMENTO.....	33
2.1.1 Porcelanato.....	35
2.1.2 Processo de usinagem para placas cerâmicas alto brilho.....	38
2.2 Usinagem com ferramenta de geometria não definida.....	45
2.2.1 Formação dos cavacos durante o processo de retificação.....	46
2.2.2 Força de corte na retificação.....	48
2.2.3 Distribuição de energia na retificação.....	49
2.2.4 Cinemática do processo de retificação.....	50
2.2.5 Ferramenta empregada no processo de retificação.....	52
2.2.6 Rebolos para retificação de porcelanato.....	53
2.3 DESGASTE ABRASIVO.....	54
2.3.1 Formação de trincas por indentação em materiais frágeis.....	57
2.3.2 Defeitos decorrentes do processo de retificação frágil.....	61
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	67
3.1 MATERIAL DE TRABALHO.....	67
3.2 Caracterização básica da placa cerâmica de porcelanato.....	67
3.2.1 Resistência mecânica por flexão a 4 pontos.....	67
3.2.2 Dureza Vickers.....	68
3.2.3 Brilho.....	68
3.2.4 Rugosidade.....	68
3.2.5 Determinação de densidade aparente e densidade real.....	68
3.2.6 Caracterização do módulo de elasticidade (E) e tenacidade à fratura (K_{IC}).....	69
3.3 Ensaio de riscamento em retificadora plana.....	72
3.4 ESCLERÔMETRO CNC.....	76
3.4.1 Ensaio de riscamento empregando esclerômetro CNC.....	78
3.4.1.1 Riscamento simples.....	78
3.4.1.2 Riscamento cruzado.....	78
3.4.1.3 Riscamento paralelo.....	79
3.5 ANÁLISES.....	81
3.5.1 Perfilometria óptica.....	81
3.5.1.1 Avaliação da profundidade de riscamento.....	81
3.5.1.2 Área transversal afetada.....	82
3.5.2 Microscopia óptica e análise digital de imagem.....	82
3.5.3 Avaliação da força no ensaio de riscamento paralelo.....	85

3.5.4 Microscopia eletrônica de varredura.....	85
3.5.5 Avaliação dos modelos matemáticos propostos para remoção de material.....	86
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	87
4.1 CARACTERIZAÇÃO BÁSICA.....	87
4.1.1 Resistência mecânica por flexão a 4 pontos.....	87
4.1.2 Dureza Vickers.....	87
4.1.3 Rugosidade.....	88
4.1.4 Brilho.....	89
4.1.5 Determinação de densidade aparente e real.....	89
4.1.6 Caracterização do módulo de elasticidade (E) e tenacidade à fratura (K_{Ic}).....	89
4.2 Riscamento empregando retificadora plana.....	89
4.2.1 Microscopia óptica e análise digital de imagem.....	89
4.2.2 Avaliação da profundidade de riscamento.....	91
4.2.3 Área transversal afetada.....	93
4.2.4 Microscopia eletrônica de varredura.....	94
4.3 Riscamento empregando esclerômetro CNC.....	99
4.3.1 Microscopia óptica e análise digital de imagem.....	99
4.3.1.1 Riscamento simples.....	100
4.3.1.2 Riscamento cruzado.....	100
4.3.1.3 Riscamento paralelo.....	104
4.3.2 Perfilometria óptica.....	108
4.3.2.1 Avaliação de profundidade no riscamento simples.....	108
4.3.2.2 Área transversal afetada em riscamento simples.....	109
4.3.2.3 Área transversal afetada em riscamento paralelo.....	109
4.3.3 Análise de força durante o riscamento com esclerômetro CNC.....	111
4.3.3.1 Riscamento simples.....	111
4.3.3.2 Riscamento cruzado.....	114
4.3.3.3 Riscamento paralelo.....	115
4.3.4 Microscopia eletrônica de varredura.....	116
4.3.4.1 Riscamento simples.....	116
4.3.4.2 Riscamento cruzado.....	118
4.3.4.3 Riscamento paralelo.....	120
4.4 Modelagem matemática para remoção de material.....	122
5 CONCLUSÕES.....	127
5.1 Ensaio de riscamento em retificadora plana.....	127
5.2 ESCLERÔMETRO CNC.....	127
5.2.1 Ensaio de riscamento simples.....	127
5.2.2 Ensaio de riscamento cruzado.....	128
5.2.3 Ensaio de riscamento paralelo.....	128

5.3 MODELAGEM MATEMÁTICA.....	128
5.4 APLICAÇÃO TÉCNICA.....	129
5.5 Sugestões para trabalhos futuros.....	129
REFERÊNCIAS.....	131
APÊNDICE A – Grupo de trabalho.....	139
APÊNDICE B – Programa de simulação Polibem.....	141
APÊNDICE C – Imagens por microscopia óptica e identificação digital para riscamento empregando retificadora plana.....	145
APÊNDICE D – Imagens por microscopia óptica e identificação digital para riscamento cruzado.....	147
APÊNDICE E – Imagens por microscopia óptica e identificação digital para riscamento paralelo.....	151
ANEXO A – Relatório de rugosidade média (Ra).....	153
ANEXO B - Relatório de ensaio de densidade aparente.....	154
ANEXO C – Relatório de ensaio de densidade real.....	155

1 INTRODUÇÃO

O porcelanato é o produto para revestimento cerâmico, com produção em larga escala, com o maior valor agregado e desenvolvimento tecnológico disponível no mercado atualmente. O porcelanato polido tem apresentado ótima aceitação no mercado mundial devido à alta resistência mecânica, alta resistência ao desgaste e principalmente o seu alto brilho, característica que provoca grande apelo estético. Em função disto, pode ser considerado um material no qual a sinergia entre a tecnologia de produção e as propriedades físico-mecânicas é otimizada quando comparado aos revestimentos cerâmicos tradicionais, como densidade, resistência à flexão, dureza e resistência ao desgaste (Wiggers, et al., 2007). Por isso o porcelanato alto brilho vem ocupando o nicho de mercado que anteriormente era dominado pelas pedras naturais polidas, como mármore ou granito, mesmo que o processo de usinagem eleve em torno de 30 a 40 % o preço final do produto (Hutchings, et al., 2005), (Hutchings, et al., 2005).

O processo de usinagem para obtenção do porcelanato alto brilho se divide em várias etapas diferentes, sendo a primeira delas a retificação plana de mergulho para desbaste. A retificação tem como função principal remover os defeitos de ortogonalidade, proporcionando uma superfície plana, e obrigatória, para as etapas seguintes. Etapas estas responsáveis pela redução de rugosidade e desenvolvimento do brilho final na peça. Segundo Sánchez (2001), ao longo do processo de usinagem ocorrem três transformações principais na peça: a perda de massa, diminuição da rugosidade e aumento do brilho (Sánchez, 2001). Um fator marcante das etapas posteriores à retificação, é que dois terços do processo são utilizados apenas para retirar os defeitos introduzidos na etapa de retificação. Esta característica é originária do comportamento extremamente frágil do porcelanato, somado ao mecanismo de desgaste predominante na etapa de retificação, o microlascamento. Grande parte destes defeitos se deve ao fato do processo de usinagem de porcelanato ser fundamentado em conhecimento empírico, ou então em extrapolações diretas do processamento de pedras naturais ou materiais metálicos (Orts, et al., 2001), (Sánchez, et al., 2002).

Comumente os parâmetros utilizados no processo de usinagem de porcelanato são obtidos por “tentativa e erro”, e adaptações diretamente na linha industrial, dependendo fortemente da experiência e sensibilidade do operador para ajuste do maquinário. Por isso, estes parâmetros são normalmente superdimensionados para que se obtenha a qualidade mínima requerida em toda a superfície da peça (Sousa, et al.,

2008). Como contrapartida, ocorre o desgaste excessivo de ferramental, maior consumo de água para refrigeração das ferramentas, maior volume de resíduos sólidos gerados, maior consumo de energia por parte do maquinário, maior tempo de processo, maior tempo de produção perdido com máquina parada para testes, e aumento dos custos totais de processo (Hutchings, et al., 2005), (Malkin, et al., 1996), (Dondi, et al., 2005), (Esposito, et al., 2004).

Com o intuito de que os vários processos de usinagem envolvidos na obtenção do porcelanato alto brilho sejam baseados em conhecimentos científicos, diversos estudos estão sendo desenvolvido mundialmente (Hutchings, et al., 2005), (Sánchez, 2001), (Sánchez, et al., 2002), (Sousa, et al., 2008), (Rosso, et al., 2005). Como resultado de um destes trabalhos, foi desenvolvido o programa Polibem para simulação computacional da cinemática do processo de brunimento, sendo apresentado em maior detalhe no APÊNDICE B (Sousa, 2007). Porém, devido à complexidade de todos os fatores contidos no processo, a etapa de retificação ainda se encontra totalmente fora deste programa.

Assim o trabalho proposto tem como objetivo aperfeiçoar o processo de usinagem de porcelanato, aplicando conhecimento científico de tribologia e cinemática para a etapa de retificação plana de mergulho. Nesta otimização será considerada a interação física entre o grão abrasivo e a superfície cerâmica, propondo uma condição cinemática para desbaste da superfície que ofereça a melhor distribuição de contatos abrasivos. Vale ressaltar que durante o trabalho foi considerado o equilíbrio entre o estado da arte científica e a viabilidade econômica industrial, a fim de gerar um produto com as características de brilho exigidas pelo mercado, balanceado com a produtividade exigida na indústria (Malkin, et al., 1996).

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho foi estudar a cinemática e o sistema tribológico atuante durante a usinagem frágil de placas de porcelanato, visando otimizar a taxa de remoção de material.

1.1.1 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos são listados:

- Estudar a influência das variáveis de processo e suas interações;

- Identificar as condições de riscamento atuantes durante a usinagem frágil de porcelanato;
- Propor configurações cinemáticas e tribológicas, visando otimizar a produtividade do processo de retificação frágil durante a usinagem de porcelanato;

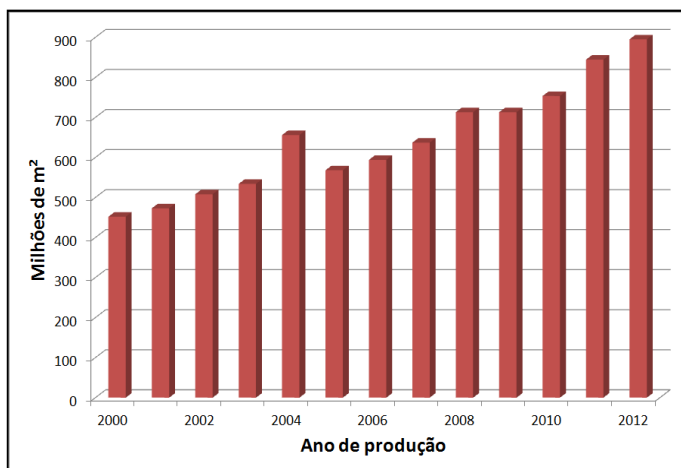
2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CERÂMICA DE REVESTIMENTO

A cerâmica de revestimento tem uma grande importância na economia da indústria brasileira, com participação de aproximadamente 0,2 % no PIB (Produto Interno Bruto), correspondendo a cerca de R\$ 8 bilhões, sendo o porcelanato 8,5 % do total comercializado. O desenvolvimento do setor cerâmico nacional se deve principalmente à abundância de matérias-primas naturais, fontes alternativas e relativamente baratas de energia, e disponibilidade de conhecimentos técnicos embutidos nos equipamentos industriais empregados. Atualmente os segmentos de produtos cerâmicos produzidos no Brasil apresentam qualidade internacional, fato este comprovado pelo grande volume de exportações realizado no setor (ABCERAM, 2009), (CNI, 2010).

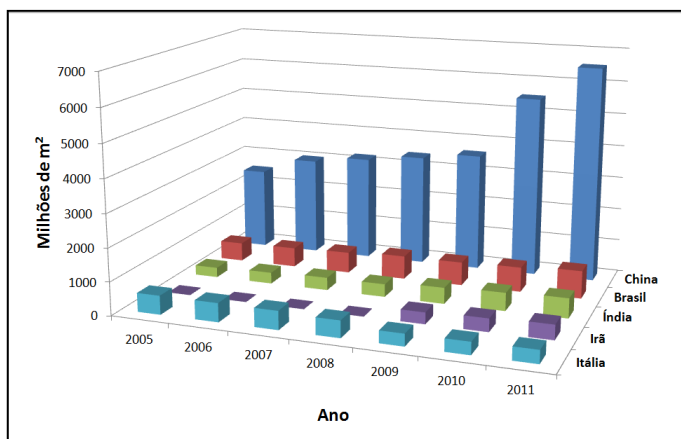
Segundo a Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimento – ANFACER –, a indústria de revestimento cerâmico no Brasil é um segmento produtivo com capital essencialmente nacional, empregando as melhores tecnologias disponíveis no mundo, e com grande parte de sua produção em conformidade com as normas internacionais de qualidade ISO. Avaliando a Figura 1 pode-se ver a evolução constante do setor de revestimento cerâmico no Brasil. Já na Figura 2 pode-se ver a representatividade da indústria brasileira mundialmente, despontando como o segundo maior produtor mundial (ANFACER, 20013).

Figura 1: Produção de revestimento cerâmico no Brasil.



Fonte: Adaptado de (ANFACER, 20013)

Figura 2: Principais produtores mundiais de revestimento cerâmico.



Fonte: Adaptado de (ANFACER, 20013).

2.1.1 Porcelanato

Comumente o porcelanato é utilizado como uma classe de placa cerâmica destinada à construção civil para o revestimento de pisos e paredes, tanto em ambientes internos como externos (Hutchings, et al., 2005), (Hutchings, et al., 2005), (De Noni Jr, 2007), (Wang, et al., 2003). De acordo com as normas técnicas nacionais para classificação de produtos cerâmicos de revestimento e os valores apresentados na Quadro 1, uma placa cerâmica pode ser considerada um porcelanato se possuir um teor de absorção de água em ensaio normatizado menor que 0,5 % quando esmaltado ou menor que 0,1 % quando não esmaltado (Rosso, et al., 2005), (ABNT NBR 15463, 2007). Embora estes valores não reflitam diretamente a porosidade total de aproximadamente 3 a 7 %, pois esta é interna e não comunicante com o exterior (Dondi, et al., 2005), (Arantes, et al., 2001), (Cavalcante, et al., 2004).

Quadro 1: Classificação de revestimentos cerâmicos segundo o grau de absorção de água e correspondente aplicações residenciais.

Grupo	Absorção de água	Aplicações residenciais
BIa	0,0-0,5 %	Pisos, parede – ambientes externos e internos (Porcelanato)
BIb	0,5-3,0 %	Pisos, parede – ambientes externos e internos (Grés)
BIla	3,0-6,0 %	Pisos, parede – ambientes externos e internos (Semi-Grés)
BIlb	6,0-10 %	Pisos, parede – ambientes externos e internos (Semi-poroso)
BIII	Acima de 20 %	Paredes (Azulejo)

Fonte: Adaptado de (NBR 13818, 1997), (Cabral Jr., et al., 2010).

Segundo a norma brasileira ABNT NBR 15463:2007: “Porcelanatos são placas cerâmicas para revestimento constituídas por argilas, feldspatos e outras matérias-primas inorgânicas. Destinam-se a revestir pisos e paredes, podendo ser conformados por prensagem, extrusão ou por outros processos. O processo de fabricação envolve elevado grau de moagem, alto teor de matérias-primas fundentes e alta densificação após a queima, resultando em produtos com baixa

porosidade e elevado desempenho técnico. Podem ser esmaltados ou não, polidos ou naturais, retificados ou não retificados” (ABNT NBR 15463, 2007). O termo retificado se refere à operação de calibração dimensional ao final de processo, onde as laterais da placa cerâmica são esquadrejadas, e esta baixa variação dimensional possibilita o assentamento sem a utilização de rejunte.

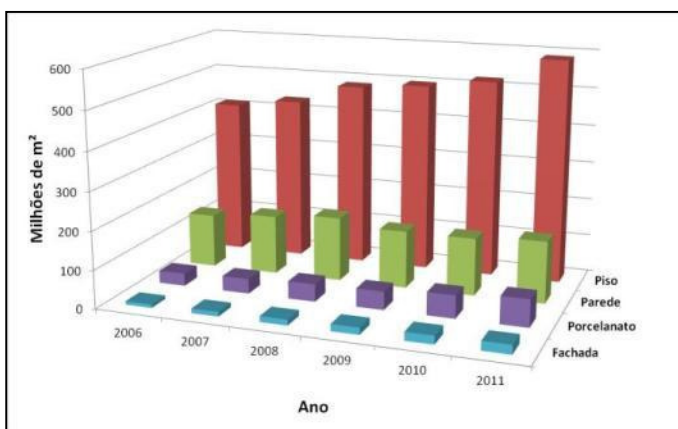
Após o desenvolvimento da queima rápida (monoqueima) que caracterizou o final dos anos 70 e boa parte dos anos 80, a segunda grande revolução no setor cerâmico deu-se com a concepção do grés porcelanato. Este que se difere dos demais tipos de revestimentos cerâmicos por seu processo de produção altamente tecnológico, o qual envolve apenas uma queima em ciclo rápido de 45 a 50 minutos a temperaturas de 1200 a 1250 °C (Cabral Jr., et al., 2010), (Menegazzo, et al., 2000). O início da produção e comercialização do porcelanato teve origem na Itália, sendo denominado “*grès porcellanato*”. A palavra “*grès*”, na terminologia cerâmica, significa um produto muito compactado, constituído por várias fases cristalinas dispersas em uma matriz vítrea. O termo “*porcellanato*” tem origem no termo porcelana. No Brasil, por forte influência italiana aliada à campanha publicitária junto ao mercado, o produto passou a ser conhecido como “*grés porcelanato*” (De Noni Jr, 2007).

Analisando a composição física, as placas cerâmicas de porcelanato são caracterizadas por uma matriz vítrea abundante, entre 50 e 65 % em volume, com partículas cristalinas dispersas e porosidade total entre 3 e 7 %. Sua composição mineral básica é uma mistura de argilominerais, feldspatos e quartzo. A fração cristalina é formada normalmente por partículas de quartzo (10 – 25 %), mulita (< 10 %), feldspatos não fundidos (0 – 10 %) e ainda silicato de zircônio ou alumina (0 – 10 %), utilizados como opacificantes (De Noni Jr, 2007), (Wang, et al., 2003), (Sánchez, et al., 2005). O argilomineral tem a função de prover plasticidade e resistência mecânica à placa durante as etapas pré-queima, e como formadora de mulita e fase vítrea durante a queima. A função principal do feldspato é a formação de fase vítrea para promover a densificação. A função do quartzo é prover estabilidade térmica e dimensional à peça, característica esta devida à sua alta temperatura de fusão. No caso do porcelanato, os ciclos são muito mais rápidos e as temperaturas mais baixas do que para as porcelanas. Este ciclo rápido condiciona muitas de suas propriedades finais.

O porcelanato é o produto cerâmico de produção em larga escala de maior valor agregado, podendo chegar a valores próximos de R\$ 250,00/m² para peças de alta qualidade técnica, grandes dimensões

ou texturas especiais (Moura, et al., 2006), (Cabral Jr., et al., 2010). Destacam-se como propriedades desses produtos: alta resistência mecânica e ao desgaste, e elevado brilho quando submetido a um processo de acabamento superficial (Esposito, et al., 2004), (Klocke, 1997), (Agarwal, et al., 2008). A Figura 3 mostra que a produção de porcelanato ainda é pequena quando comparada a outros tipos de revestimentos tradicionais, principalmente devido ao alto custo do produto, mas em contrapartida, é visto na mesma figura um aumento expressivo da produção dentro dos anos apresentados.

Figura 3: Produção brasileira por tipo de produto.



Fonte: Adaptado de (ANFACER, 20013).

A introdução do processo de usinagem para beneficiamento superficial do porcelanato foi uma inovação de grande importância na indústria de cerâmica para revestimento (Sánchez, et al., 2005), (Bittencourt, et al., 2002). Em um mercado antes dominado por pedras naturais, o apelo estético obtido com o porcelanato alto brilho serviu como motivo principal para sua admissão como produto concorrente (Cavalcante, et al., 2004), (Menegazzo, et al., 2000), (Heck, 1996). Além do fator estético, tem-se também o menor custo do porcelanato quando comparado às pedras naturais (Heck, 1996). Assim, com o passar dos anos, o porcelanato alto brilho tem se tornado um produto bastante popularizado e a sua inserção no mercado é cada vez mais rápida (Hutchings, et al., 2006), (Raimondo, et al., 2006), (Rambaldi, et al.,

2007). Um dos obstáculos ainda a ser superado é a sua baixa resistência ao manchamento. Sendo que esta ocorre principalmente em peças que sofreram algum tipo de usinagem, devido ao processo expor a porosidade remanescente do processo de sinterização, e inicialmente interna. Estes poros, em contato com o ambiente podem reter corantes ou pigmentos de difícil remoção. Como forma de minimizar este problema, normalmente é aplicada uma camada polimérica impermeabilizante a superfície logo após o processo de acabamento (Arantes, et al., 2001), (Cavalcante, et al., 2004), (Moura, et al., 2006).

Devido ao fato da usinagem de cerâmicos para obtenção do alto brilho ter se iniciado com as pedras naturais, muitas das máquinas, bem como seus parâmetros de processo, foram diretamente transpostas do processo em pedras naturais para o beneficiamento de porcelanatos. Já na indústria cerâmica, o processo sofreu adaptações ao longo do tempo, mas estas adaptações foram baseadas principalmente no conhecimento empírico de técnicos industriais e na sensibilidade dos operadores de máquina (Esposito, et al., 2004), (Hutchings, et al., 2006).

Dentre os principais processos de usinagem tradicional, aqueles que empregam ferramentas de geometria não definida são os mais caros por volume de material removido. Os custos envolvidos na retificação de materiais cerâmicos são citados em literatura como os principais responsáveis pelo alto custo dos produtos que requerem remoção de material com precisão dimensional e/ou qualidade superficial (Marinescu, et al., 2000), (Fujita, et al., 2006). Atualmente, o custo dos vários processos de usinagem para obtenção do alto brilho é responsável por aproximadamente 40 % do custo final da placa de porcelanato, sendo que este valor é obviamente repassado ao preço final para o consumidor (Hutchings, et al., 2005), (Hutchings, et al., 2005).

2.1.2 Processo de usinagem para placas cerâmicas alto brilho

A primeira impressão da qualidade do produto é extremamente influenciada por sua aparência superficial. Para muitos produtos, um brilho homogêneo e consistente é considerado um importante parâmetro de qualidade decorativa, sendo este brilho influenciado fortemente pelos parâmetros de produção adotados (Kigle-Boeckler, 1995).

A usinagem de componentes cerâmicos é uma etapa dispendiosa e extremamente crítica devido à sua alta dureza, resistência à abrasão, refratariedade, estabilidade química e principalmente pela predominância de fratura frágil (Malkin, et al., 1996), (Wang, et al., 2003), (Barsoum, 1997), (Shen, et al., 2002), (Lee, et al., 2000). A

configuração do processo depende mutuamente da microestrutura do material e dos parâmetros de trabalho adotados. A maioria dos materiais cerâmicos não pode ser usinada utilizando as mesmas ferramentas empregadas para os metais, isto porque as ferramentas não são duras o suficiente para realizar o desgaste da superfície do material cerâmico, ou esta aplica uma carga excessiva à cerâmica, provocando sua fratura (Li, et al., 1997). A ferramenta precisa obrigatoriamente apresentar ao menos uma fase mais dura que o componente cerâmico que está sendo usinado, para que assim ocorra o desgaste da superfície de trabalho, e não da ferramenta (Richerson, 1992). Para este fim, normalmente são empregados grãos de diamante como material abrasivo.

O processo de usinagem de placas de porcelanato alto brilho é uma operação que é aplicada industrialmente em larga escala, mas as informações científicas referentes aos parâmetros cinemáticos de processo ou à fenomenologia de desgaste são bastante restritas (Zhang, et al., 2003). Atualmente, as informações se baseiam principalmente no conhecimento empírico das empresas que o realizam, cabendo aos operadores de máquina e técnicos industriais determinarem por “tentativa e erro” os melhores parâmetros de processo (Orts, et al., 2001), (Sánchez, et al., 2002).

Especificamente para o porcelanato, a camada externa apresenta grande importância, pois esta possui maior densidade e sua remoção expõe a porosidade interna antes escondida. Seguindo a teoria de Griffith para poros superficiais, estes atuam como concentradores de tensão, e se tornam sítios para o início e propagação de novas trincas (Dondi, et al., 2005), (Wang, et al., 2003). Assim, após a usinagem, a superfície apresenta uma redução na resistência mecânica, resistência à abrasão e aumento da susceptibilidade ao manchamento devido à exposição dos poros antes ocultos (Esposito, et al., 2004), (Rosso, et al., 2005), (Cavalcante, et al., 2004), (Bittencourt, et al., 2002), (Heck, 1996).

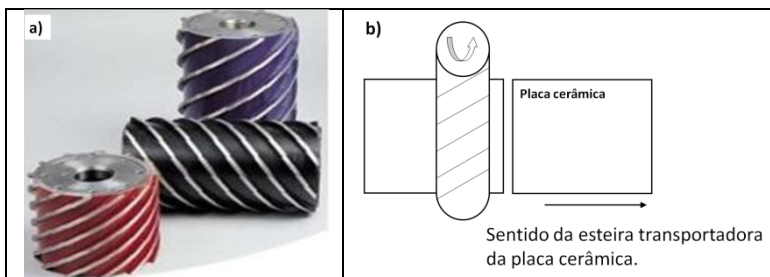
A operação industrial de usinagem para obtenção de porcelanatos alto brilho pode ser dividida em várias etapas diferentes, sendo a primeira delas a retificação plana de mergulho para desbaste e calibração da superfície onde se deseja o brilho. Para que uma operação de retificação seja viável economicamente, é desejada a otimização da usinabilidade do conjunto. Esta grandeza expressa por meio de um valor numérico comparativo (porcentagem), as propriedades de usinagem do conjunto em relação a um outro tomado como padrão. Estes valores podem ser avaliados a partir da maximização na remoção de material por número de contato abrasivo, sem que ocorra a degradação da superfície, desgaste prematuro da ferramenta, ou danos superficiais e

subsuperficiais na peça de trabalho (Malkin, et al., 1996), (Fujita, et al., 2006). Em função disto, mesmo melhorando a qualidade estética do porcelanato ao conceder brilho e tornando-o mais competitivo em face às pedras naturais, a usinagem frágil pode causar grave dano à superfície trabalhada quando efetuado de forma inadequada. E consequentemente, acarretando características negativas, como aumento do tempo de trabalho, aumento dos custos de produção, redução da qualidade e da vida útil do produto (Hutchings, et al., 2005), (Malkin, et al., 1996), (Dondi, et al., 2005), (Esposito, et al., 2004). Se todas etapas do processo não forem dominadas e corretamente controladas, a superfície resultante poderá apresentar brilho heterogêneo, vestígios de ranhuras, sulcos, cortes, trincas subsuperficiais e desprendimento de material em longo prazo.

Durante todo o processo de usinagem, a área de contato entre abrasivo e placa é inundada com água corrente, como forma de remover o calor excessivo e os cavacos gerados durante o processamento (Hutchings, et al., 2005), (Alves, 2010). A soma de todas as etapas do processo provoca uma redução de aproximadamente 10 % na espessura da peça (0,5 até 1,5 mm) (Wiggers, et al., 2007), (Sánchez, et al., 2002), (Dondi, et al., 2005). Segundo Sánchez (2001), ocorrem três principais transformações na peça ao longo do processo: a perda de massa, a diminuição da rugosidade e o aumento do brilho (Sánchez, 2001), (Hutchings, et al., 2006).

Durante a calibração da superfície, as peças são retificadas utilizando rebolos metálicos com partículas grosseiras de diamante como material abrasivo, com granulometria decrescente de 400 até 150 μm (Klocke, 1997), (Hutchings, et al., 2006), (Li, et al., 2007). O primeiro rebolo diamantado usualmente apresenta revestimento particulado espiralar, conforme mostrado na Figura 4 (Tyrolit, 2009). A utilização de rebolo com perfil espiralar se deve principalmente à necessidade do grande aporte de água para lubrificação e retirada de calor, onde este tipo de configuração da ferramenta pode diminuir a geração de calor entre 40 e 80 % (Bittencourt, et al., 2002), (Lee, et al., 2000), (Yin, et al., 2005). Estes rebolos, em sua maioria, possuem apenas movimento rotativo em torno do seu eixo e abrangem toda a largura da peça.

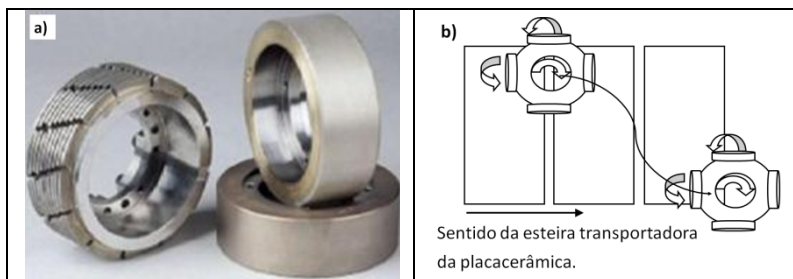
Figura 4: a) Modelos de rebolos diamantados com perfil de corte espiral; b) Disposição do reboło e sentido de movimento da placa cerâmica.



Fonte: Adaptado de (Tyrolit, 2009).

No segundo passe de retificação são empregados rebolos com revestimento particulado espiralar ou com revestimento abrasivo em toda a superfície do reboło, conforme mostrado na Figura 5 (Tyrolit, 2009). Este tipo de reboło pode ou não conter cavidades para auxílio na condução e distribuição de fluido refrigerante. Durante o processo, o reboło apresenta movimento de rotação no próprio eixo, e translação em torno de um eixo central. Na ocasião da placa cerâmica que está sendo retificada exceder o diâmetro nominal da árvore de suporte, esta também realizará movimento de oscilação lateral, a fim de poder trabalhar a totalidade da superfície da placa.

Figura 5: a) Modelos de rebolos diamantados com perfil de corte espiralar e liso; b) Modelo de funcionamento para placa cerâmica com largura maior que diâmetro nominal da árvore.

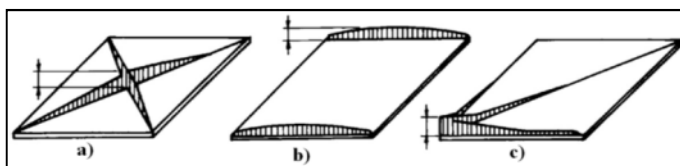


Fonte: Adaptado de (Tyrolit, 2009).

Ao fim da etapa de retificação, a superfície da placa cerâmica normalmente apresenta ranhuras profundas devido ao sistema grosseiro de remoção de material, sendo que estas ranhuras explicitam o sentido e direção de usinagem empregado naquela região (Sánchez, et al., 2002).

Em trabalho realizado por Sánchez (2002), foi verificado que a rugosidade média (R_a) da placa cerâmica após a queima é de aproximadamente $69\text{ }\mu\text{m}$, e que após a etapa de retificação esta sobe pra $145\text{ }\mu\text{m}$, ou seja, ocorre aumento da rugosidade com perda de brilho (Sánchez, et al., 2002). Apesar do efeito negativo na rugosidade, a obrigatoriedade da etapa de retificação se justifica pela sua capacidade de retirar defeitos de ortogonalidade com aproximadamente 1 mm altura da placa cerâmica, sendo estes provenientes da etapa de conformação e/ou queima, como os apresentados na Figura 6 (NBR 13818, 1997), (CCB, 2009).

Figura 6: Defeitos de ortogonalidade em placas cerâmicas pós queima: a) curvatura central; b) curvatura lateral; c) empenamento



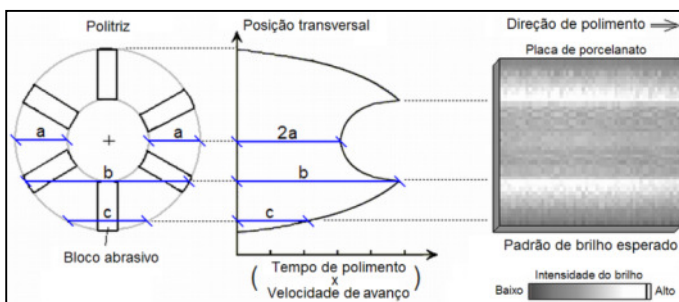
Fonte: Adaptado de (NBR 13818, 1997), (CCB, 2009).

Na sequência a retificação, inicia-se o processo de brunimento, sendo que este não tem capacidade de corrigir os erros anteriormente apresentados, pois remove pequeno volume de material. Este se destina apenas para remoção dos defeitos superficiais introduzidos na retificação e desenvolvimento do brilho final (Sánchez, et al., 2002). Caso o brunimento seja realizado em uma peça que apresente defeito de ortogonalidade, apenas a parte mais alta da peça entrará em contato com o ferramental abrasivo. Como compete a este a geração de brilho na superfície da placa cerâmica, a distribuição de brilho será totalmente irregular, tendo regiões de baixo brilho e outras com alto brilho (Rosso, et al., 2005), (Bittencourt, et al., 2002).

Na segunda etapa de usinagem são realizados os processos de brunimento plano fino e ultrafino, que normalmente utilizam pedras fabricadas em cimento magnésiano com grãos abrasivos de carbeto de

silício (SiC). Durante o decorrer do processo a granulometria destas diminui continuamente de 24 até 2500 Mesh (Hutchings, et al., 2005), (Sousa, 2007), (Chiamulera, 2011). Durante o brunimento, os picos de material deixados pela retificação são removidos gradativamente. Em conjunto com a redução da altura média dos picos, ocorre a redução da granulometria de SiC para que seja gerada a superfície lisa e com o alto brilho desejado (Rosso, et al., 2005). As pedras, usualmente chamadas de *fickerts*, são dispostas tangencialmente ao disco de suporte. Igualmente ao que acontece para retificação, quando o tamanho da placa cerâmica exceder o diâmetro da árvore suporte, esta realiza movimento de oscilação lateral para que possa atingir toda a superfície da peça. Este movimento também pode ser realizado em peças de tamanho pequeno, para que se evite o defeito chamado “sombra de polimento”. Nesta situação, devido ao formato da cabeça de brunimento e posicionamento dos *fickerts*, certas zonas são desfavorecidas e sofrem menor número de contato abrasivo durante o processo, assim obtendo qualidade irregular de brilho conforme apresentado na Figura 7 (Sousa, 2007).

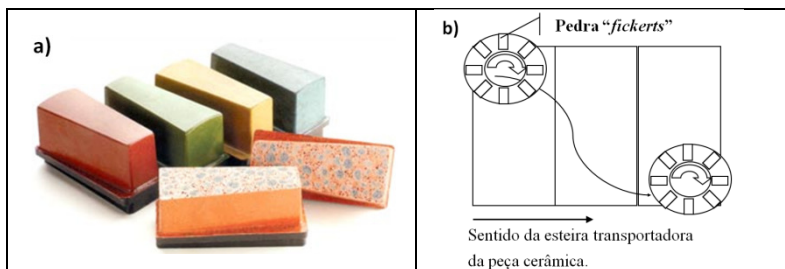
Figura 7: “Sombras de polimento” devido ao favorecimento geométrico promovido pela geometria da cabeça de brunimento sem oscilação lateral



Fonte: Adaptado de (Sousa, 2007).

Na Figura 8, são apresentados diferentes tipos de pedras para brunimento de porcelanato, explicitando o grão abrasivo de granulometria grosseira e um esquema simplificado da árvore de brunimento com as pedras dispostas na periferia (Atech, 2009).

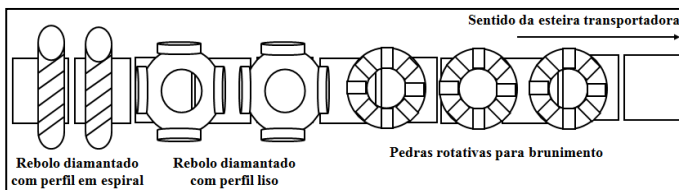
Figura 8: a) Diferentes tipos de pedras utilizadas no brunimento de porcelanato; b) Árvore de brunimento com 6 pedras acopladas à árvore efetuando oscilação lateral



Fonte: Adaptado de (Atech, 2009).

No transcorrer dos passos do processo de usinagem, ocorrem mudanças nos mecanismos de desgaste atuante (Klocke, 1997), (Hwang, et al., 1999). Na etapa de retificação, a perda de material se dá principalmente por microlascamento, caracterizando um regime frágil de desgaste. Conforme a granulometria média do grão de diamante reduz, a profundidade de corte e tamanho de cavaco também diminui. Quando é iniciado o processo de brunimento, o mecanismo de remoção de material passa gradativamente para microcorte e microsulcamento. Nesta etapa, começa a ocorrer deformação plástica da superfície da placa cerâmica sem perda de massa. Normalmente, a partir da última metade da linha de brunimento, a perda de massa da placa é praticamente inexistente (Sánches, et al., 2002). Esta deformação plástica aplicada pelas pedras de brunimento com baixa granulometria (partículas de SiC menor que $9,3\ \mu\text{m}$) é responsável pela redução drástica da rugosidade, e consequente ganho de brilho. A partir deste ponto, o principal fator limitante do brilho será a porosidade exposta, devido à retirada da camada superficial (Sánchez, et al., 2005). Uma linha tradicional de usinagem apresenta em média 4 ou mais rebolos diamantados, e 26 ou mais cabeçotes de brunimento (Hutchings, et al., 2005), (Sousa, et al., 2008). Um modelo simplificado da linha de usinagem é apresentada na Figura 9.

Figura 9: Esquema simplificado das etapas de usinagem para revestimento cerâmico alto brilho.



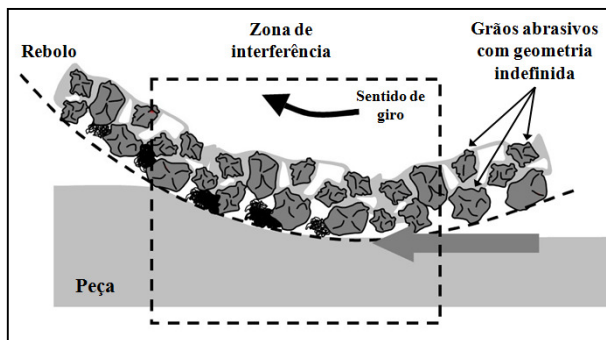
Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2 USINAGEM COM FERRAMENTA DE GEOMETRIA NÃO DEFINIDA

O processo de usinagem utilizando ferramentas de geometria não definida é caracterizado pelo uso de pequenos grãos abrasivos, dispostos de forma aleatória na ferramenta, onde estes grãos possuem geometria não definida. A remoção de material ocorre quando os grãos protusos e a peça de trabalho, em condição de interferência, têm movimento relativo entre si.

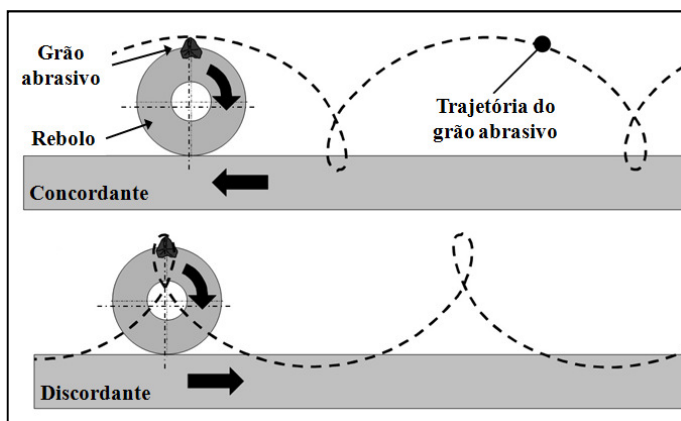
Estes grãos podem estar em posições fixas, nos processos de brunimento ou retificação; ou suspensos em um meio, nos processos de lapidação, polimento e jateamento abrasivo. Quanto ao movimento, os grãos podem ter trajetórias definidas, no processo de retificação; serem pressionados de forma contínua contra a peça de trabalho, no processo de brunimento; serem limitados por uma superfície de referência, no processo de lapidação; ou grãos soltos munidos de energia cinética, no jateamento abrasivo (König, 1980). As características anteriormente apresentadas para a retificação podem ser visualizadas de forma simplificada na Figura 10 e Figura 11.

Figura 10: Esquema representativo para usinagem por geometria não definida por retificação



Fonte: Adaptado de (Klocke, 2005).

Figura 11: Esquema representativo para trajetória do grão abrasivo durante a retificação.



Fonte: Adaptado de (Klocke, 2005).

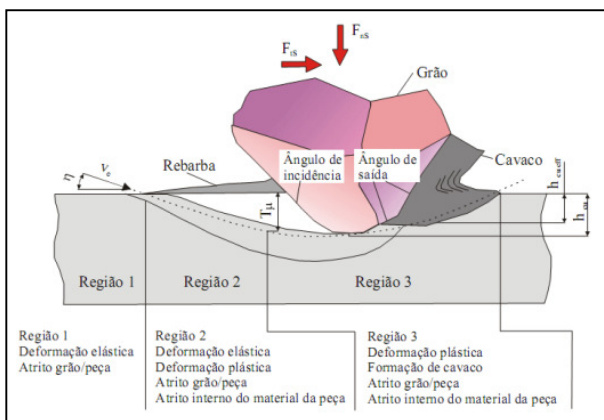
2.2.1 Formação dos cavacos durante o processo de retificação

Especificamente para o processo de retificação, a ferramenta denominada “rebolo” desenvolve movimento angular em torno do seu eixo, podendo este eixo ter movimento de translação ou ser fixo. Devido

à aleatoriedade da forma, tamanho e gume dos grãos protusos, do corte e formação dos cavacos durante o processo de usinagem, é necessária uma abordagem estatística do processo para sua qualificação.

De forma simplificada, a formação do cavaco para materiais dúcteis pode ser dividida em três etapas, conforme mostrado na Figura 12 (König, 1980), (Chen, et al., 1996).

Figura 12: Regiões de deformação durante a formação de cavaco.



Fonte: Adaptado de (König, 1980), (Lopes, 2007).

- Região I: ocorre apenas deformação elástica e atrito entre o grão abrasivo e a peça;
- Região II: ocorre deformação elástica e plástica (sulcamento) e atrito entre o grão abrasivo e a peça;
- Região III: ocorre deformação elástica e plástica, atrito entre grão abrasivo e a peça. Especificamente para materiais frágeis ocorre o microlascamento.

As características do cavaco e processo de corte estão fortemente atreladas às características de agressividade do rebolo (grau de afiação do grão abrasivo), aos parâmetros de operação utilizados (profundidade de corte, velocidade de corte, velocidade da peça), ao coeficiente de atrito entre o grão abrasivo e o material da peça, e à relação de diâmetros rebolo/peça (Lopes, 2007).

Devido à grande parcela de atrito desenvolvida nas três etapas do processo de corte, grande quantidade da energia do processo é

transformada em calor (Chen, et al., 1996). Este calor excessivo normalmente precisa ser retirado da interface rebolo/peça, e para isto são empregados fluidos como água, óleos ou emulsões. Quando a refrigeração do processo não é efetuada de forma adequada, é habitual ocorrer desgaste prematuro do rebolo, perda do gume de corte nos grãos, alterações microestruturais na peça e perda de precisão dimensional por dilatação térmica, entre outras características negativas.

2.2.2 Força de corte na retificação

Para análise das forças durante o processo de retificação, é possível decompor a força atuante sobre o grão abrasivo em uma componente no plano de corte (F_{ts}), e outra no sentido normal a peça (F_{ns}). O quociente entre F_{ns}/F_{ts} é comumente denominado de relação de força de usinagem. A relação inversa, F_{ts}/F_{ns} , é denominada relação de atrito aparente e individualiza as condições de atrito apresentadas na zona de contato. A partir da variação destas relações é possível identificar os mecanismos de desgaste atuantes no sistema. No caso de o microlascamento ser o mecanismo predominante, tem-se altos valores para F_{ts} , valendo a analogia inversa quando o desgaste se dá por mecanismos dúcteis. Vale ressaltar que estas relações, apesar de indicativas, não representam necessariamente o valor real do coeficiente de atrito entre a peça e o grão abrasivo (De Mello, 1994), (Chen, et al., 1996), (Sena, 2007), (König, 1980).

A força resultante durante a operação de usinagem é um somatório vetorial das forças normal e tangencial. Por isto a força que atua instantaneamente é diretamente proporcional ao somatório de todas as interações individuais de cada grão (König, 1980).

Na região I apresentada na Figura 12, existe uma predominância da força normal, força esta necessária para entrada do gume na peça e iniciar o corte. Com a evolução do movimento para as regiões II e III, ocorre um aumento da força tangencial e redução da força normal.

Assim gumes mais afiados – com raio de gume menor ($p.s$) –, ou com maior atrito entre o gume e a peça, favorecem o início do corte e formação do cavaco. A funcionalidade do gume mais afiado é devido à facilidade de penetração na peça para retirada de material. Já o aumento no valor de atrito entre gume e a peça, dificulta o escoamento do material da peça por debaixo do grão abrasivo, facilitando a retirada de material na forma de cavaco. Aplicando ferramentas com gumes com pequeno valor de raio de gume e alto atrito entre a peça e o gume, é possível obter uma redução na energia geral despendida para usinagem.

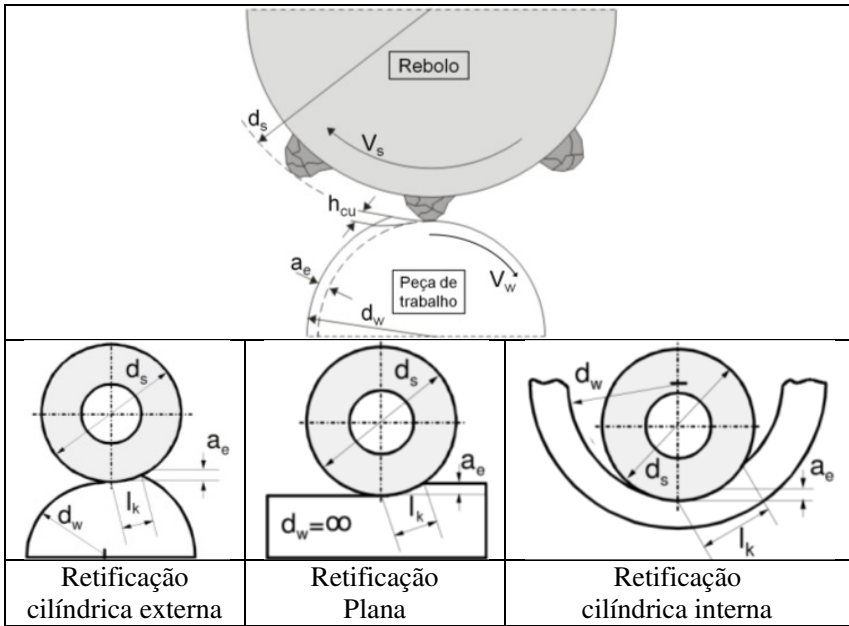
A analogia contrária também é verdadeira, onde gumes com alto valor de raio ou grãos com baixo atrito gume/peça, normalmente retardam o início da formação de cavaco. Quando isto ocorre, um grande volume de calor é gerado durante a retificação, pois os gumes apenas atiram contra a peça, sem formação de cavaco, gerando majoritariamente deformação plástica (Sena, 2007), (König, 1980).

2.2.3 Distribuição de energia na retificação

Durante o processo de retificação, o esforço aplicado a cada grão singularmente é pequeno. Entretanto, se considerada a integralidade da largura de contato do rebolo, se dá um grande emprego de energia no processo. Devido à grande parcela de energia transformada em deformação plástica sem formação de cavaco, o atrito entre os gumes sem corte e a peça, e a pequena espessura de usinagem, podemos ter uma grande transferência de energia térmica a superfície trabalhada. Se comparados os processos de usinagem com ferramenta de geometria definida e não definida, este último pode impor a peça em trabalho de 8 a 10 vezes mais energia na forma de calor (Sena, 2007). Esta parcela de calor que não é transportada pelo cavaco, precisa ser retirada com emprego de fluidos lubri-refrigerantes a fim de evitar danos tanto à peça quanto ao rebolo.

Na Figura 13 podemos ver que a geração de calor se dá principalmente em quatro pontos. Devido a pouca afiação dos gumes de corte, a maior parte da energia mecânica é transformada em energia térmica pelo atrito no flanco dos gumes e pela deformação plástica na superfície da peça. Partes do calor gerado também provêm do atrito do ligante do rebolo com a peça, ou na face dos grãos durante a remoção do cavaco.

Figura 14: Dependência entre a espessura de usinagem e as variáveis de entrada e as condições de contato.



Fonte: Adaptado de (König, 1980).

Esta dependência pode ser descrita pela Equação 1 (König, 1980).

$$h_{cu} \approx k \left[\frac{1}{C_{stat}} \right]^\alpha \left[\frac{v_w}{v_s} \right]^\beta \left[\frac{a}{d_{se}} \right]^\gamma \quad (1)$$

Onde k é uma constante de proporcionalidade, e os expoentes α , β e γ são constantes experimentais que podem assumir valores entre 0 e 1.

O comprimento de contato l_k depende da geometria a ser usinada e uma aproximação é calculada a partir da Equação 2 (König, 1980).

$$l_k = \sqrt{a d_{se}} \quad (2)$$

O diâmetro equivalente (d_{se}) é um parâmetro que está relacionado às condições de contato entre rebole e peça. Este indica o diâmetro que o rebole utilizado na retificação cilíndrica deveria ter para proporcionar a

mesma geometria de corte quando utilizado na retificação plana. Na retificação plana, o diâmetro equivalente é o próprio diâmetro do rebolo. O diâmetro equivalente é dado pela Equação 3.

$$d_{se} = \frac{d_w d_s}{d_w \pm d_s} \quad (3)$$

O sinal positivo no denominador é empregado para calcular o diâmetro equivalente no processo de retificação cilíndrica externa, enquanto o sinal negativo é empregado para a retificação cilíndrica interna.

Com a interpretação da Equação 1, pode-se prever que com o aumento da velocidade periférica do rebolo, ou com a redução da velocidade de deslocamento da peça, a espessura média do cavaco não deformado diminui. A velocidade periférica do rebolo não tem influência direta sobre a taxa de material removido, pois com o aumento da velocidade ocorrerá apenas um aumento no número de cavacos gerados para o mesmo volume de material.

2.2.5 Ferramenta empregada no processo de retificação

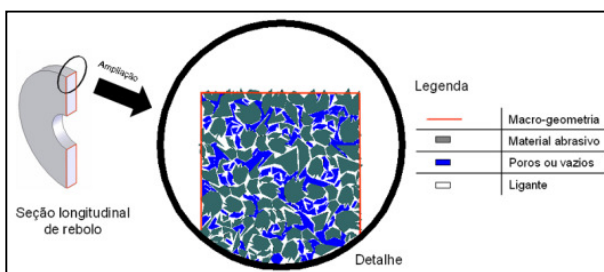
A ferramenta utilizada na usinagem de geometria não definida por retificação é o rebolo, onde este é constituído de grãos abrasivos de materiais duros. Para que esta remoção de material possa ser procedida durante um período de tempo longo, o material abrasivo precisa ser mais duro que a superfície de trabalho, possuir estabilidade térmica na temperatura de trabalho, estabilidade química face aos fluidos lubrificantes e ao material que está sendo retificado (König, 1980).

Dependendo do tipo de grão abrasivo empregado e dos parâmetros de processo, o rebolo pode ser integralmente feito do material abrasivo, ou ter uma camada abrasiva aplicada a um disco suporte. Este disco tem como funções básicas, o suporte do abrasivo ligado e a transmissão do torque de acionamento. Ele pode ser constituído de materiais compósitos ou de metais. Possíveis materiais compósitos são as resinas, como a baquelite, reforçadas com fibra de vidro, óxido de alumínio (Al_2O_3) ou outras cargas. Com relação aos metais, podem ser usados o aço ou alumínio, entre outros. O disco de suporte proporciona ainda economia de material abrasivo e contribui para a melhoria das características dinâmicas do sistema, aumentando a sua tenacidade e auxiliando na absorção de impactos. Como materiais

abrasivos podem ser utilizados tanto materiais naturais quanto sintéticos. Dentre os principais grãos naturais, tem-se o quartzo, corindum, granada e diamante. Na qualidade de grãos sintéticos tem-se o óxido de alumínio cristalino (Al_2O_3), carbetto de silício (SiC), diamante sintético, e o nitreto de boro cúbico (CBN) (König, 1980).

Como pode ser visto na Figura 15, o rebolo abrasivo é composto essencialmente por três elementos: grãos abrasivos, poros e ligantes. O grão abrasivo é quem realiza a operação de usinagem propriamente dita, trabalhando na função de corte da superfície. O poro tem a função de acumular e transportar o cavaco gerado, e também servir para transporte de fluido lubri-refrigerante à zona de usinagem. O ligante tem a função de coesão estrutural do rebolo, servindo como meio de união entre os grãos abrasivos (König, 1980).

Figura 15: Representação esquemática do rebolo abrasivo.



Fonte: Adaptado de (Sena, 2007).

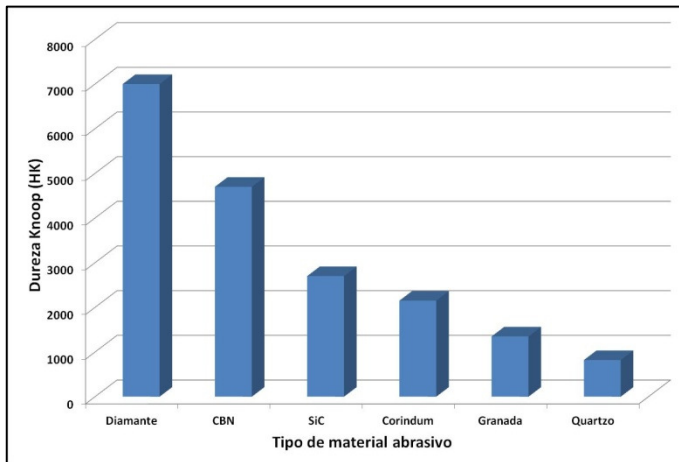
2.2.6 Rebolos para retificação de porcelanato

O diamante é o material de maior dureza conhecido pelo homem, podendo ser natural ou sintético. Ambos os tipos de diamantes podem ser empregados na fabricação de rebolos. O rebolo diamantado é empregado para a retificação de materiais extremamente duros, frágeis e quebradiços, tais como metal duro, quartzo, cristal, pedras preciosas, mármore, granito e revestimentos cerâmicos sinterizados (Sena, 2007). Apesar da alta dureza do diamante, este apresenta limitações quanto à temperatura de operação, pois a partir de 900 °C o diamante sofre grafitação e a partir de 1400 °C ocorre oxidação.

A Figura 16 apresenta um comparativo entre diferentes tipos de materiais que podem ser utilizados como grãos abrasivos para rebolo,

explicitando a máxima dureza obtida pelo diamante. Os valores são para condições normais de temperatura e pressão (CNTP).

Figura 16: Dureza Knoop (HK) para diferentes materiais utilizados como grãos abrasivos.



Fonte: (Sena, 2007).

2.3 DESGASTE ABRASIVO

O desgaste abrasivo é um fenômeno interfacial bastante complexo, o qual pode ser definido como a perda de material da superfície ativa de uma peça pelo movimento relativo com partículas abrasivas e/ou superfície antagonista rugosa. Dentre os eventos inclusos nos mecanismos de desgaste que tornam sua análise bastante complexa, é possível citar: rugosidade, deformações da região de contato, geração de calor por atrito, presença de contaminantes e cavacos, lubrificação, reações químicas entre superfícies, entre outros (Hegadekatte, et al., 2005), (De Mello, 1994).

Este tipo de desgaste corresponde a 50 % dos casos de falha por desgaste, o que lhe confere grande importância econômica (Eyre, 1976), (Sousa, et al., 2006). Estimativas indicam que 1 a 5 % do produto interno bruto das nações desenvolvidas é gasto, direta ou indiretamente, pela ação negativa do desgaste abrasivo (Hegadekatte, et al., 2005). Embora o fenômeno de desgaste seja muito conhecido pelos aspectos

negativos, o mesmo apresenta fatores positivos como, por exemplo, a usinagem de materiais frágeis e duros por retificação (De Mello, 1994), (Davidge, 1979). Nesta operação é desejado alcançar o maior desgaste possível da peça de trabalho, com o menor gasto de energia em atrito e desgaste do rebolo abrasivo (Ashy, et al., 1982).

A deformação e/ou fratura localizada que ocorrem no contato são de fundamentais importâncias práticas, pois delas iniciam os mecanismos para remoção de material. Deste modo, com o intuito de otimizar os comportamentos desejados do desgaste abrasivo, ou reduzir os indesejados, se faz necessário o estudo e compreensão do comportamento tribológico.

Durante a abrasão de uma superfície, os eventos ocorridos seguem uma linha de evolução, sendo estes normalmente irreversíveis. Durante a interferência entre a superfície e as partículas abrasivas, são gerados fragmentos de ambos. A forma destes, bem como o mecanismo pela qual ocorre a remoção, é dependente diretamente do sistema tribológico local e imediato. Portanto, durante o estudo do desgaste de um corpo, não é possível uma abordagem exclusiva em função das propriedades do material de análise, devendo ser considerado todos os integrantes do sistema tribológico (abrasivo + superfície + ambiente) (De Mello, 1994), (Sousa, et al., 2006).

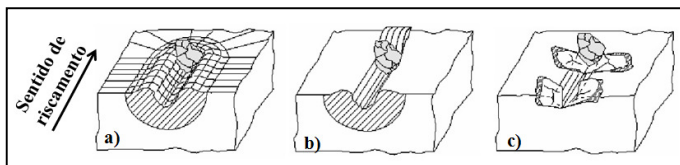
De uma maneira geral, em um processo abrasivo, o sistema tribológico é composto de um complexo abrasivo, da peça solicitada e de um produto interfacial. O complexo abrasivo é constituído de protuberâncias duras e/ou partículas abrasivas, livres ou não. O contato entre a protuberância dura e/ou a partícula abrasiva e a superfície antagonista é determinado pelo conjunto das condições atuantes no sistema. De forma simplificada, o desgaste abrasivo pode ser subdividido em dois tipos básicos, abrasão a dois corpos e/ou três corpos. Na abrasão a dois corpos, partículas fixas ou asperidades duras possuem movimento relativo em relação à peça abrasionada. Quando de três corpos, ocorre a existência de partículas livres entre as superfícies animadas de movimento relativo entre si.

Para estudo e análise do desgaste abrasivo são utilizadas simplificações do modelo de Rabinowics (Hutchings, 1992 apud. Rabinowics, 1965). Neste modelo o risco é analisado isoladamente, podendo este ser provocado por uma protuberância ou partícula dura liberta no meio, ou então para análise laboratorial, por uma ferramenta. Esta última pode ter geometria definida ou não, com características previamente determinadas. A retificação é um processo de usinagem que têm por objetivo a remoção de material da peça através da fricção ou

interferência da mesma com um material abrasivo. Tanto os ensaios de desgaste abrasivo quanto as técnicas de esclerometria são ferramentas de extrema importância na simulação destes processos, contribuindo para a caracterização do sistema tribológico e uma possível otimização dos parâmetros de processo empregados no maquinário (Nascimento, et al., 2011).

Dependendo do sistema tribológico imposto, a perda de material por desgaste abrasivo pode ocorrer seguindo umas das três classes apresentadas na Figura 17 (De Mello, 1994), (Sousa, et al., 2006), (Klocke, 2005).

Figura 17: Tipos de mecanismo para desgaste abrasivo: a) microsulcamento; b) microcorte; c) microlascamento.



Fonte: Adaptado de (De Mello, 1994), (König, 1980).

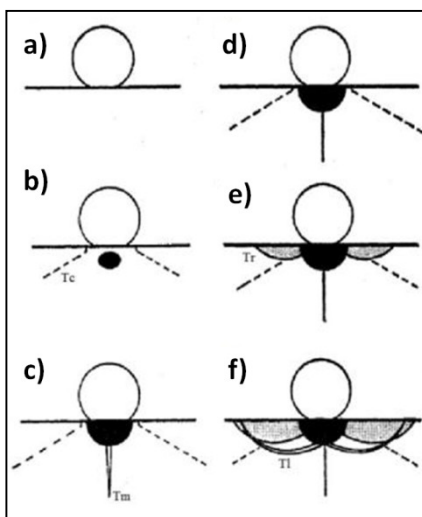
Os mecanismos podem ser descritos de forma simplificada como:

- **Microsulcamento:** a protuberância responsável pelo desgaste sulca a superfície da peça, onde esta deforma plasticamente sem que haja perda de material. O excesso de material flui plasticamente para a lateral e/ou para a frente da protuberância. A perda de material se dá por fenômenos de fadiga, após uma longa série de deformações plásticas;
- **Microcorte:** força exercida pela protuberância de desgaste é superior à tensão cisalhante da peça, assim a perda de material se dá na frente do gume onde são formados microcavacos;
- **Microlascamento:** perda de material se dá pela formação e propagação de trincas, onde fragmentos de material são removidos da peça de forma súbita. Mecanismo predominante para materiais frágeis;

2.3.1 Formação de trincas por indentação em materiais frágeis

Materiais cerâmicos são de modo geral extremamente frágeis, e a remoção de material ocorre principalmente pelo fenômeno de microlascamento (Ahn, 2003). Quando da ocorrência da fratura, sua natureza depende fortemente de fatores como as propriedades mecânicas do indentador e da superfície de trabalho, do tamanho e forma do indentador (Marinescu, et al., 2000). A forma da trinca gerada é particularmente sensível à presença ou não de deformação plástica na região exatamente abaixo do indentador (Davidge, 1979). Sendo assim, a remoção de material durante o processo de retificação para placas cerâmicas do tipo porcelanato deve seguir, de forma aproximada, à sequência de etapas apresentadas no modelo da Figura 18.

Figura 18: Etapas da remoção de material por indentação em materiais frágeis.

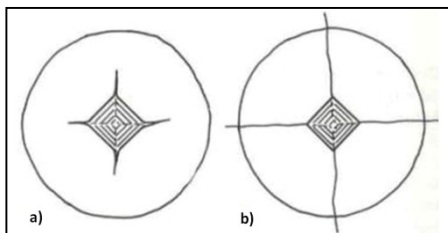


Fonte: Adaptado de (Swain, et al., 1976).

Inicialmente, ocorre o contato entre o gume de corte e a superfície da peça de forma elástica [Figura 18a], podendo ser descrito pelo campo de tensão de Hertz (Hutchings, 1992 apud. Hertz, 1896). Além da tensão crítica de deformação elástica, o material sofre deformação ou fratura irreversível (Guiberteau, et al., 1993). Com o aumento da pressão de

contato, a tensão cisalhante imposta supera a tensão de escoamento do material, ocorrendo deformação permanente simbolizada pelo campo negro abaixo da superfície [Figura 18b]. Durante o ciclo de carga, trincas anelares superficiais podem se formar a partir do centro da área de contato. Com o contínuo aumento da carga, as trincas anelares podem desenvolver trincas cônicas (T_c), e geralmente em torno do grão indentador é desenvolvida uma zona de deformação plástica com formação de zonas de acumulação lateral de material. Na próxima etapa, ocorre a formação de uma trinca mediana (T_m) exatamente abaixo do indentador, e paralela à direção da força de penetração [Figura 18c]. Com o início do descarregamento, a trinca mediana começa a se fechar devido às forças compressivas do material deformado elasticamente durante a indentação [Figura 18c]. A continuidade do descarregamento é acompanhado pela formação de trincas radiais, transversais à superfície (Tr), aproximadamente a metade da força aplicada [Figura 18e]. Em situações onde o sistema é sobrecarregado e possui cantos vivos, trincas radiais podem se formar antes do descarregamento. Não foi estabelecido ainda se o sistema de trincas radiais é uma extensão do sistema de trincas medianas subsuperficiais, ou se estas iniciem a partir da área de contato entre indentador e amostra, e continuem sua propagação durante o descarregamento. Se uma trinca cônica Hertziana esta presente no sistema, não existem indicações de que esta exerça influência sobre a forma ou extensão das trincas radiais (Wikipedia, 2013). Pouco antes de completar o descarregamento, a tensão subsuperficial é suficientemente grande para que ocorra a nucleação e propagação de um novo sistema de trincas paralelas à superfície, denominadas trincas laterais (Tr) [Figura 18f]. Com o afloramento das trincas laterais à superfície, ocorre o destacamento e perda de grande volume de material (Malkin, et al., 1996), (Agarwal, et al., 2008), (Ahn, 2003). Do afloramento das trincas laterais advém a principal forma de remoção de material durante a usinagem de materiais frágeis (Wang, et al., 2003), (Lawn, et al., 1983). Entretanto o comprimento da trinca lateral é variável, mas sempre maior que a diagonal do indentador, podendo estas serem maiores ou menores que as trincas radiais, conforme apresentado na Figura 19 (McColm, 1990).

Figura 19: a) Trincas laterais maiores que trincas radiais; b) Trincas laterais menores que trincas radiais.



Fonte: Adaptado de (McColm, 1990).

Comparado às trincas radiais, trincas laterais são mais suscetíveis ao crescimento subcrítico de trinca. Isto por que os elementos corrosivos podem penetrar através das trincas radiais, e o posicionamento das trincas laterais ser próximo à superfície.

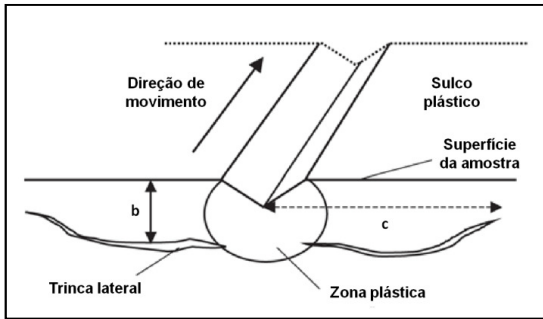
Uma aproximação da quantidade de material que pode ser removido por indentação frágil de uma superfície pode ser obtido a partir da Equação 4 (Hutchings, 1992), (Stachowiak, 2005), (Cavalcante, et al., 2003).

$$Q \propto \frac{W}{HK_c} \quad (4)$$

Onde Q é o volume de massa perdida por unidade linear, W a carga aplicada, H é a dureza Vickers do material e K_c a tenacidade a fratura do material.

Modelos simplificados do processo de desgaste foram propostos por Evans e Marshall, idealizados a partir de um corpo abrasivo, que com certa carga aplicada e movimento linear, produz um sulco na superfície do material cerâmico, conforme apresentado na Figura 20.

Figura 20: Modelo do mecanismo de abrasão na superfície de um material frágil.



Fonte: Adaptado de (Hutchings, 1992).

O volume removido é definido pela expansão das trincas laterais, onde b é a profundidade da trinca, e c o comprimento paralelo à superfície, sendo estas representadas pela Equação 5 e Equação 6, respectivamente. Tal volume corresponde, por unidade de escoamento, a $2bc$ e pode ser calculado sabendo que (Stachowiak, 2005), (Cavalcante, et al., 2003), (Evans, 1981):

$$b = a_1 \sqrt[5]{\left(\frac{E}{H}\right)^2} \sqrt[2]{\frac{W}{H}} \quad (5)$$

$$c = a_2 \frac{\sqrt[5]{\frac{E^3}{H}} \sqrt[8]{W^5}}{\sqrt[2]{K_c} \sqrt[8]{H^5}} \quad (6)$$

Onde a_1 e a_2 são constantes geométricas e E é o módulo de Young.

A partir deste esquema geométrico, foi iniciado o desenvolvimento de modelagens matemáticas que permitem estimativas da quantidade de material abrasionado por unidade de escoamento do corpo abrasivo. Na Equação 7 e Equação 8 apresentadas a seguir, são exibidos dois dos modelos mais comumente citados em literatura específica para usinagem frágil, principalmente quando relacionado a revestimentos cerâmicos.

$$\begin{array}{ll} \text{Modelo de Evans} \\ \text{\& Marshall} \end{array} \quad Q = a_3 \frac{\sqrt[3]{W^9}}{\sqrt{K_c} \sqrt[3]{H^5}} \sqrt[5]{\left(\frac{E}{H}\right)^4} \quad (7)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Modelo de} \\ \text{Hutchings} \end{array} \quad Q = a_4 \frac{\sqrt[4]{W^5} \sqrt[2]{d}}{\sqrt[4]{A} \sqrt[4]{K_c} \sqrt[3]{H^2}} \quad (8)$$

Onde a_3 e a_4 são constantes experimentais dependentes do tipo de material em estudo, d é a dimensão da partícula abrasiva e A é a área aparente de contato.

Muito embora, as modelagens matemáticas anteriormente apresentadas forneçam uma previsão da quantidade de material removida durante a usinagem frágil, estas ainda são baseadas principalmente em análises experimentais, regressões lineares e deduções dimensionais semi-empíricas. Muitas vezes é evitada uma abordagem mais minuciosa dos mecanismos físicos responsáveis pela evolução da fratura localizada e remoção de material, como forma de simplificação do objeto de estudo. Tendo noção de tais limitações, trabalhos estão sendo efetuados por outros pesquisadores de forma a completar tais modelos matemáticos, bem como ampliar sua aplicação para materiais cerâmicos policristalinos (Lawn, 1975), (Lawn, 1980).

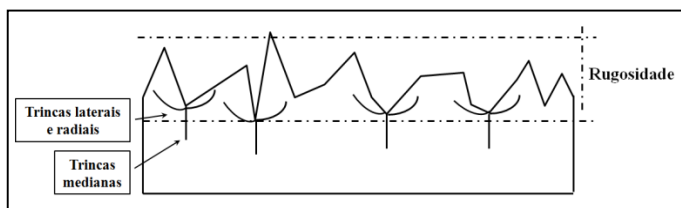
De forma sucinta, estes são os passos simplificados e modelagens matemáticas do mecanismo pelo qual ocorre a remoção de material por usinagem frágil de materiais cerâmicos, sendo os dois modelos acima apresentados os mais citados na literatura para revestimentos cerâmicos sinterizados (Stachowiak, 2005), (Swain, et al., 1976), (Cavalcante, et al., 2003), (Green, 1998), (Hagan, et al., 1978).

2.3.2 Defeitos decorrentes do processo de retificação frágil

O acúmulo de um conjunto de contatos abrasivos com partículas agudas resulta em uma remoção de material por microlascamento. Este comportamento é a base de processos de usinagem em materiais frágeis (Sánchez, et al., 2002). Porém este mesmo processo de remoção de material pode ser extremamente prejudicial onde é esperada confiabilidade mecânica ou integridade superficial, como é o caso de revestimentos cerâmicos do tipo porcelanato alto brilho (Wang, et al., 2003), (Lawn, et al., 1983).

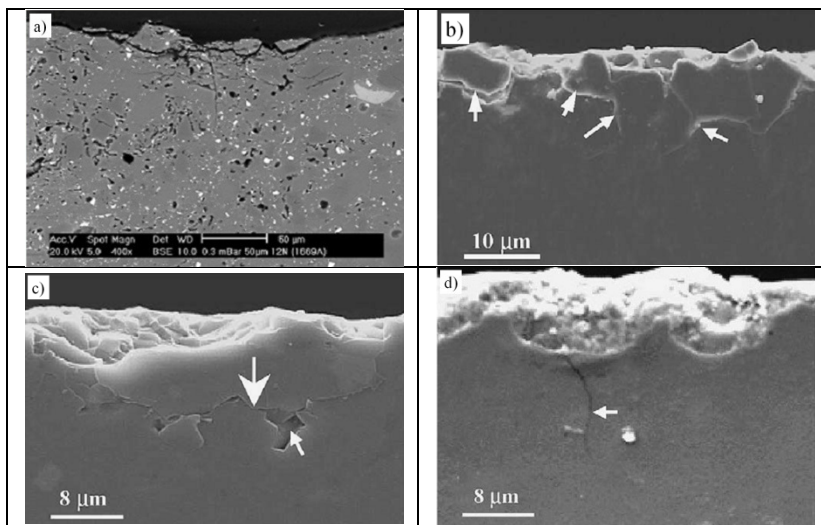
Como efeito negativo da retificação, ocorre a introdução de uma diversidade de trincas e danos superficiais e/ou subsuperficiais nas placas cerâmicas (Agarwal, et al., 2008), (Lee, et al., 2000), (Li, et al., 1997), (Komanduri, 1996). Um esquema simplificado do sistema de trincas residuais após a retificação de materiais frágeis, e da rugosidade resultante é apresentado na Figura 21. A Figura 22 exibe microfotografias coletadas na literatura, onde é possível visualizar trincas residuais após ensaios de esclerometria, como as trincas medianas e laterais (Sánchez, et al., 2002), (Huang, et al., 2003). Estas falhas, quando perturbadas, podem levar ao posterior destacamento de material da superfície, redução da resistência mecânica, falha mecânica da peça, e perda de brilho prematuramente (Zhang, et al., 2003).

Figura 21: Esquema simplificado da rugosidade e sistema de trincas residuais após retificação em materiais frágeis.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22: a) Indentador com ponta cônica de 50 μm e carga de 12 N, trincas medianas e laterais; b) retificação plana, trincas por fratura intergranular; c) retificação plana, trincas laterais, com presenças de porosidade; d) retificação plana, trinca mediana.



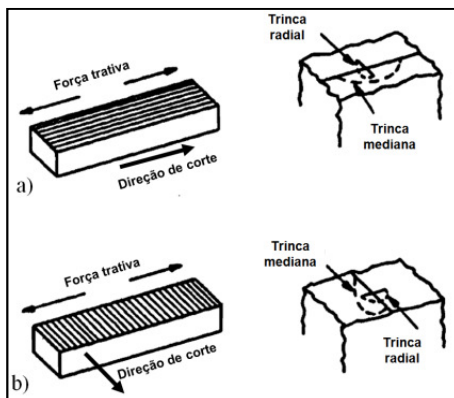
Fonte: Adaptado de (Sánchez, et al., 2002), (Zhang, et al., 2003), (Huang, et al., 2003).

Para um rebolo adequadamente dressado, aproximadamente 35 % do grão abrasivo é exposto acima da superfície, sendo a profundidade de corte de 60 % da altura exposta (Shearer, 2013). Entretanto, um fator importante a ser considerado é que a profundidade de penetração das trincas não sofre grande influência dos parâmetros de processo selecionados, visto que a profundidade desta depende principalmente do tamanho do grão abrasivo utilizado no rebolo de retificação (Agarwal, et al., 2008), (Mayer, et al., 1995). Assim, uma condição de desbaste mais agressiva pode ser utilizada para que se aumente a produtividade do processo, principalmente para cerâmicos altamente frágeis (Zhang, et al., 2003). Segundo Wang (2003), o fato de a retificação deixar pequenas ranhuras e trincas pode ser algo desejável ao processo, já que estas contribuiriam para o aumento da remoção de material nas primeiras etapas de brunimento (Wang, et al., 2003).

Para cerâmicos, a remoção de material por desgaste abrasivo envolve diferentes mecanismos. Os mecanismos iniciam com a compactação do material, e posterior dano, como a formação de sulcos, cortes, ou trincas superficiais e/ou subsuperficiais por fratura frágil (Hutchings, 1992). Para que se obtenha qualidade na superfície e o brilho desejado, os danos gerados durante o processo de retificação devem primeiramente ser removidos, visto que a superfície que foi retificada carrega consigo uma memória do processo sofrido, na forma de trincas, riscos ou sulcos profundos (Komanduri, 1996). Normalmente os 2/3 iniciais da etapa de brunimento são responsáveis apenas pela remoção de defeitos pertinentes ao processo de retificação plana, ficando a cargo do último 1/3 da linha de brunimento plano ultra fino a geração de brilho na superfície da placa cerâmica (Sánchez, et al., 2002).

A resistência mecânica de materiais cerâmicos é determinada principalmente pela existência e severidade dos defeitos superficiais (Chiang, et al., 1997). Assim, a presença de trincas superficiais decorrentes da retificação é algo extremamente indesejável (Agarwal, et al., 2008), (Lawn, et al., 1983), (Li, et al., 1997). Estas trincas podem se tornar ainda mais nocivas quando o conjunto direção da trinca e a direção da força trativa estiverem perpendiculares entre si. Devido a isto, trincas medianas e radiais são normalmente associadas à redução de resistência mecânica em cerâmicos usinados (Malkin, et al., 1996), (Hwang, et al., 1999), (Komanduri, 1996). Quando a solicitação for aplicada, ocorrerá uma grande concentração de tensão na ponta das trincas perpendiculares ao sentido de solicitação, sendo praticamente ausente em trincas paralelas. Assim como exemplificado na Figura 23a, para corpos retificados longitudinalmente, a concentração de tensão irá ocorrer em trincas radiais; Figura 23b para corpos retificados transversalmente, a concentração de tensão irá ocorrer nas trincas medianas. Como as trincas medianas são as mais profundas, normalmente a resistência mecânica é menor quando o corpo cerâmico é solicitado transversalmente à direção de usinagem (Marinescu, et al., 2000), (Richerson, 1992).

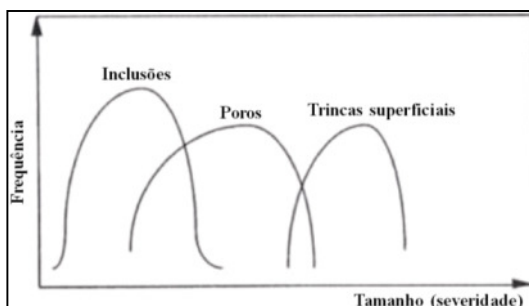
Figura 23: Relação entre direção de usinagem e o tipo de trinca solicitada em força trativa.



Fonte: Adaptado de (Richerson, 1992).

Na Figura 24 é apresentado um cenário típico de ocorrência e severidade de defeitos, ressaltando que as trincas superficiais são as mais severas para redução da resistência mecânica em materiais cerâmicos.

Figura 24: Tipos e severidade dos defeitos para materiais cerâmicos.



Fonte: Adaptado de (Green, 1998).

O crescimento subcrítico de trinca, também chamado de fadiga estática, é também um dos fenômenos que contribuem para redução da resistência de cerâmicas à base de silicatos (Callister, 1999), (Zanotto, et al., 1991). Neste sistema as trincas residuais se propagam lentamente e

fraturam o cerâmico em tensões abaixo de K_{Ic} (Souza, 2007). Este comportamento é devido à interação química que ocorre entre a umidade (vapor de água) presente no ambiente e a ponta da trinca que está se propagando (Richerson, 1992). A concentração de tensão na ponta da trinca acelera a corrosão provocada pela umidade, sendo que a velocidade de crescimento da trinca é diretamente proporcional tanto ao valor da carga aplicada, quanto à concentração de vapor de água no ambiente (Zanotto, et al., 1991). Uma fórmula geral para a reação é apresentada na Equação 9 (Rinne, 2008):



Outro obstáculo existente e ainda muito pouco estudado é a interação entre trinca e partícula para cerâmica de revestimento, visto que o porcelanato é composto por um aglomerado de partículas unidas entre si por sinterização. As teorias de fratura, formação e propagação de trincas são baseadas principalmente em corpos sem porosidade, onde normalmente não são considerados possíveis desvios de trajetória e/ou o fim da propagação da trinca devido ao encontro do limite entre partículas. Partindo da possibilidade que a trinca se propague através dos pontos de contato entre as partículas, a perda de material poderá ser grande e significativa. Interações entre trincas podem resultar em remoção de material na forma de grão/partículas inteiras, dependendo principalmente da força de coesão entre estas (McColm, 1990).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAL DE TRABALHO

Como material de trabalho, foi adquirido em loja de material para construção civil piso de porcelanato polido alto brilho, tonalidade 2R489, coloração Ivory. A escolha por placas polidas se deve ao fato de que estas possuem superfície plana, ausência de defeitos de ortogonalidade e baixa rugosidade, e deste modo, exerceriam pouca influência nos resultados dos ensaios a serem realizados.

Para cada ensaio ou análise realizada, estas placas foram cortadas em amostras menores com:

- 150x140 mm para serem presas no suporte do esclerômetro e realizar o ensaio de riscamento simples, cruzado e paralelo;
- 30x25 mm para serem presas no suporte da retificadora e realizar o ensaio de riscamento em retificação plana;
- 160x30 mm para serem apoiadas nos cutelos e ensaiadas por flexão a 4 pontos para caracterização da resistência mecânica;
- 30x25 mm para serem presas no suporte do durômetro e realizar ensaio de dureza Vickers;
- 25x3x4 mm para serem ensaiadas em flexão a 4 pontos e caracterizar o módulo de elasticidade (E) e tenacidade a fratura (K_{Ic}).

3.2 CARACTERIZAÇÃO BÁSICA DA PLACA CERÂMICA DE PORCELANATO

Estes valores serviram para definir as características fundamentais da amostra cerâmica, sendo usados como parâmetro de comparação com outros tipos de revestimentos cerâmicos mencionados em literatura (Ahn, 2003).

3.2.1 Resistência mecânica por flexão a 4 pontos

Para caracterização da resistência mecânica da placa cerâmica, foram cortados 32 corpos de prova com dimensão de 160x30 mm. A face polida industrialmente foi posicionada de forma a ser a face em tração. Para tal análise foi empregado o equipamento Zwick/Roell, modelo Z250. A montagem, regulação e operação do equipamento foi feita por aluno de doutorado do departamento de materiais (*Lehrstuhl für*

Werkstoffkunde – WKK) treinado e autorizado. As condições de ensaio aplicadas foram:

- Incremento de carga de 1 MPa/s aproximadamente (Menegazzo, et al., 2002), (NBR 13818, 1997);
- Espaçamento entre cutelos inferiores de 104 mm;
- Espaçamento entre cutelos superiores de 20 mm.

3.2.2 Dureza Vickers

Utilizando a técnica de dureza Vickers (HV), com equipamento locado na TU-KL/FBK, marca Buheler, modelo MicroMet 5103, foi avaliada a dureza da placa cerâmica a diferentes solicitações, utilizando carga de 300, 500 e 1000 g. Para realização dos ensaios, foi utilizada sempre a face polida industrialmente da placa cerâmica. As indentações foram avaliadas diretamente no microscópio acoplado à máquina, com ampliação de 50x para todas as amostras.

3.2.3 Brilho

Para determinação do brilho da face polida da placa cerâmica foi utilizado brilhômetro da marca Zehntner, modelo ZGM 1120, com ângulo de análise de 60°. Os dados foram então exportados para planilha de cálculo, onde foi calculado o valor médio de brilho e desvio padrão a partir de dez medições.

3.2.4 Rugosidade

Para determinação da rugosidade média (R_a) da face polida da placa cerâmica, foi utilizado rugosímetro da marca Mahr, modelo PS1 M300. As condições de análise foram: comprimento de análise de 4,0 mm; velocidade de deslocamento de 0,50 mm/s; raio de arredondamento da ponta do apalpador de 25 μm . Os dados foram então exportados para planilha de cálculo, onde foi calculado o valor médio de rugosidade e desvio padrão a partir de três medições em zonas distintas da placa cerâmica.

3.2.5 Determinação de densidade aparente e densidade real

Para o ensaio de densidade aparente (D_a) e densidade real (D_r), foi enviada amostra da placa cerâmica com aproximadamente 40 g ao

Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCM) SENAI/Criciúma. Este realizou o ensaio seguindo metodologia interna PR-CC-083 para densidade aparente queimado, e PR-CC-063 para densidade real de sólidos.

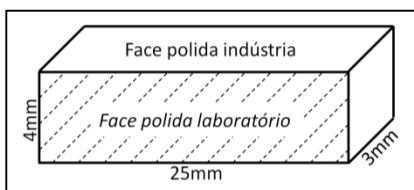
A determinação do percentual de poros ($\%_p$) nas amostras ensaiadas veio a partir dos resultados obtidos nos ensaios anteriormente mencionados. Para tal, foi feita a relação entre densidade aparente e densidade real conforme apresentado na Equação 10.

$$\%_p = \frac{D_a}{D_r} * 100 \quad (10)$$

3.2.6 Caracterização do módulo de elasticidade (E) e tenacidade à fratura (K_{Ic})

Para caracterização do módulo de elasticidade (E) e tenacidade à fratura (K_{Ic}) da placa cerâmica, foi realizado ensaio utilizando equipamento desenvolvido pelo *Institute of Advanced Ceramics*, da *Technische Universität Hamburg-Harburg* (TU-HH/AC). Para os ensaios, foram preparados corpos de prova com a dimensão de 25x3x4 mm, conforme apresentado na Figura 25. Estes foram inicialmente cortados em blocos com 25 mm de largura, utilizando o equipamento Buheler Powermet 3000, para então serem fatiados em peças menores, com 3 mm espessura, utilizando o equipamento Buheler IsoMet 4000. A redução de altura de 8 mm até 4 mm foi realizada por lixamento manual, com auxílio de politriz metalográfica marca Buehler, modelo PowerPro 5000.

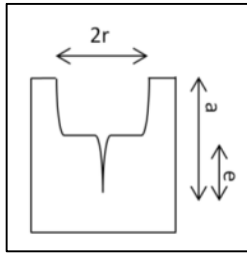
Figura 25: Amostra para caracterização do módulo de elasticidade (E) e tenacidade à fratura (K_{Ic}).



Especificamente para os corpos de prova do ensaio de tenacidade à fratura, a amostra foi entalhada e polida seguindo procedimento experimental definido pela equipe da TU-HH/AC, sendo este baseado

no trabalho desenvolvido por Munz e Fett (Munz, et al., 1999). Nestes foram realizados entalhe grosseiro e fino, conforme desenho esquemático apresentado na Figura 26.

Figura 26: Esquema representativo do entalhe para caracterização de tenacidade a fratura.



Onde:

$2r$ é a largura do entalhe grosseiro;

a é a profundidade total do entalhe;

e é a profundidade do entalhe fino;

A fim de facilitar o manuseio e transporte da amostra após o entalhe grosseiro, minimizando a sua profundidade, optou-se por utilizar o disco de corte diamantado de maior espessura disponível no laboratório, com 2 mm de largura, já que este define o valor de $2r$.

Para cálculo da profundidade total do entalhe, partiu-se da constante $\alpha = 0,6$, que representa a relação entre a espessura total da amostra e profundidade total do entalhe conforme apresentado na Equação 11.

$$\alpha = \frac{a}{h} \rightarrow 0,6 = \frac{a}{4} \rightarrow a = 2,4 \text{ mm} \quad (11)$$

Onde:

a é a profundidade total do entalhe;

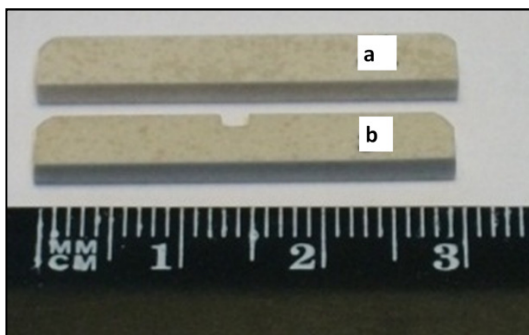
h é a espessura da amostra;

A profundidade do entalhe fino foi definida de forma que este fosse maior ou igual a $1,5 \cdot r$, ou seja, 1,5 mm. Do conhecimento do valor de profundidade total do entalhe e profundidade do entalhe fino, foi definida a profundidade do entalhe grosseiro em 0,9 mm pela diferença

entre estes. Em suma, a profundidade do entalhe grosseiro foi de 0,9 mm, entalhe fino 1,5 mm, sendo que a profundidade total de entalhe induzido (fino + grosso) foi de 2,4 mm aproximadamente.

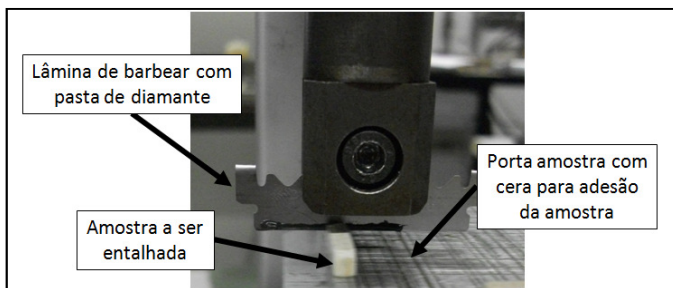
Para que a profundidade do entalhe fino pudesse ser medida no laboratório da TU-HH, se fez necessário o polimento da face lateral da amostra. Esse procedimento foi feito ainda no laboratório da TU-KL, exatamente após a realização do entalhe grosseiro. A Figura 27a mostra corpo de prova sem entalhe para caracterização do módulo de elasticidade, e na Figura 27b com entalhe grosseiro e face polida para caracterização da tenacidade a fratura.

Figura 27: a) Corpo de prova para caracterização do módulo de elasticidade; b) Corpo de prova com entalhe grosseiro e face polida para caracterização de tenacidade a fratura.



Para usinagem do entalhe fino, as amostras foram coladas no porta amostra utilizando parafina para então serem iniciados os trabalhos, conforme apresentado na Figura 28. A indução do entalhe fino foi feita com lâmina de barbear com movimento oscilante e pasta de diamante com granulometria de $9\text{ }\mu\text{m}$ até atingir a profundidade de 2,4 mm.

Figura 28: Detalhe da amostra colada ao porta amostra para início do trabalho de usinagem do entalhe fino.



Depois de atingida a profundidade de 2,4 mm, a amostra era limpa com lenço de papel e álcool etílico para retirada da pasta de diamante e cavacos. Então tinha início o processo de afiação do entalhe, onde era repetida a mesma rotina de trabalho do entalhe fino, apenas reduzindo gradativamente a granulometria do diamante para 5 μm e 1 μm . Se confirmado via microscopia óptica o afiamento do entalhe fino para raio de curvatura de 10 μm ou menos, a amostra era novamente limpa com lenço de papel e álcool etílico para retirada da pasta de diamante e cavaco. Para descolamento da amostra do porta amostra, ambos foram levemente aquecidos, sendo a amostra lavada em solvente orgânico para retirada total da cera, lavada em água corrente, seca em lenço absorvente e estocada em dissecador para análise.

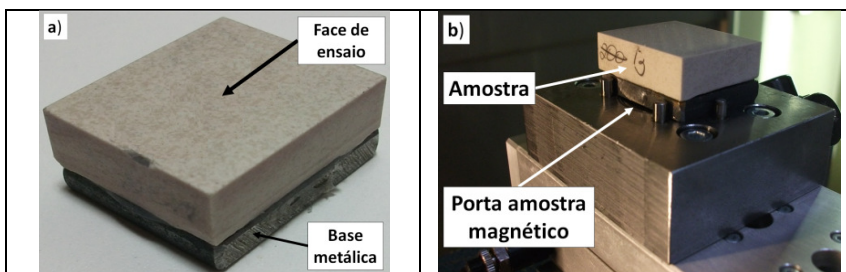
Como última etapa da preparação das amostras, estas tinham suas dimensões medidas em três pontos diferentes, utilizando a média para compor o valor nominal da mesma e efetuar os cálculos pertinentes. Após esta etapa, a amostra era entregue ao estudante de doutorado treinado e autorizado à operação da máquina, para então, serem realizados os ensaios para caracterização do módulo de elasticidade e tenacidade a fratura.

3.3 ENSAIO DE RISCAMENTO EM RETIFICADORA PLANA

Para avaliação do riscamento com velocidades e granulometrias semelhantes às empregadas em processo industrial de retificação plana, e posterior comparação com os resultados obtidos no riscamento em esclerômetro, foram realizados riscos empregando a retificadora marca ELB, modelo CAM-Master L/1 FR, e rebolo metálico com 400 mm de diâmetro no porta ferramenta.

Especificamente para este ensaio foram cortados corpos de prova com dimensão de 30x25 mm, utilizando equipamento Buheler IsoMet 4000, colados sobre chapa metálica de mesma dimensão para fixação no porta amostra magnético, conforme apresentado nas Figura 29a e Figura 29b.

Figura 29: a) Amostra para ensaio em retificadora, com base metálica para encaixe no porta amostra magnético; b) detalhe do porta amostra com suporte magnético.



Para que os riscos fossem feitos a mesma profundidade durante o deslocamento lateral da peça, foi realizada a calibração de paralelismo entre as faces da amostra com auxílio de prensa niveladora para metalografia. O paralelismo foi aferido por relógio apalpador com resolução de 0,01 mm, de forma que em todas as amostras a diferença entre o ponto máximo e o ponto mínimo fosse sempre inferior a 50 μm . As amostras que apresentaram erro superior a 50 μm foram retrabalhadas até satisfazerem este critério de qualidade, ou foram descartadas quando da impossibilidade de correção.

Especificamente para este ensaio, foi adquirida ferramenta confeccionada pela empresa Diamant-Gesellschaft Tesch GmbH, que consistia de pastilha de usinagem definida para torneamento fabricada em carbeto de tungstênio, marca Sandvick, tipo S, com um único grão de diamante fixado galvanicamente na aresta lateral da ferramenta conforme apresentado na Figura 30 e Figura 31.

Figura 30: Montagem experimental do rebolo do ensaio de riscamento em retificadora plana, com visão detalhada da ferramenta de usinagem definida com grão de diamante fixado na aresta.

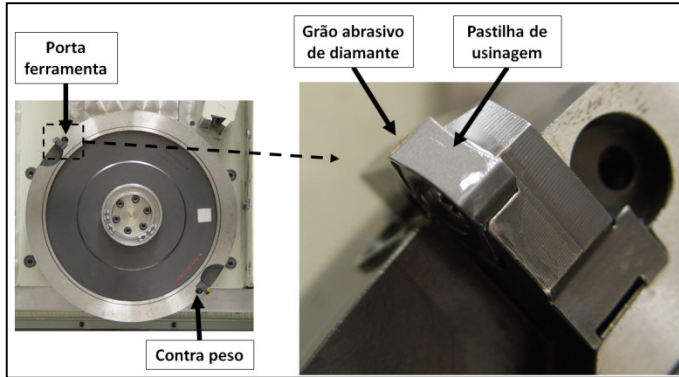
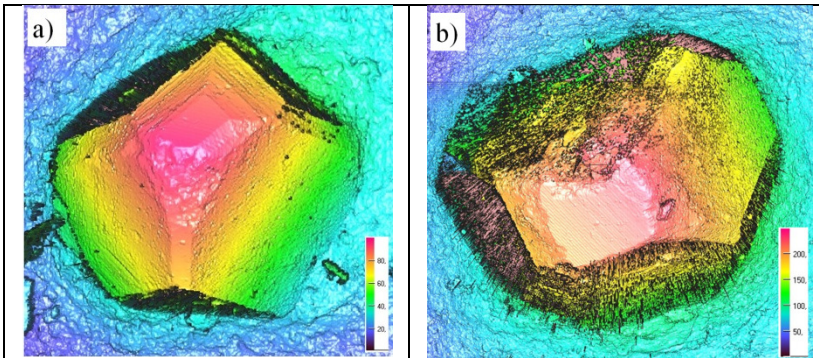
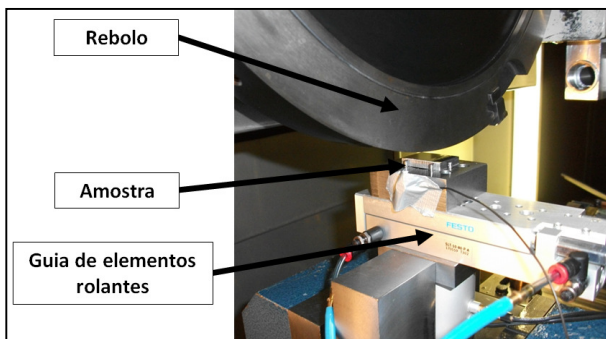


Figura 31: Microfotografia do grão abrasivo de diamante: a) 100 μm de diâmetro médio; b) 200 μm de diâmetro médio. Escala de cores em μm .



Com o objetivo de ter espaçamento mínimo de 1 mm entre os riscos e evitar a interação entre estes, o deslocamento lateral da amostra foi realizado empregando guia de elementos rolantes com acionamento pneumático, marca Festo, modelo SLT 10-80-P-A. A velocidade de deslocamento do trilho pneumático foi regulada em 12 e 16 mm/s para as velocidades de corte de 15 e 20 m/s, respectivamente. Uma visão geral do aparato sob o rebolo de retificação é apresentado na Figura 32.

Figura 32: Visão geral da montagem da guia de elementos rolantes sob o rebolo de retificação.



A montagem, regulagem e operação, tanto da retificadora quanto da guia de elementos rolantes, foi realizada por técnico de laboratório e/ou aluno de doutorado treinado e autorizado a tal operação.

O ensaio foi realizado com profundidade de mergulho de $10\ \mu\text{m}$ para todas as condições estudadas, e as variáveis analisadas foram:

- Velocidade de corte de 15 e 20 m/s;
- Grão abrasivo de diamante com 100 e 200 μm de diâmetro médio;

Em virtude do trabalho desenvolvido por Pereira (2012), que demonstrou a baixa influência do líquido refrigerante no quesito remoção de material, optou-se por realizar todos os estudos de riscamento a seco como hipótese simplificadora (Pereira, 2012). Esta condição também foi aplicada aos ensaios realizados empregando esclerômetro CNC.

Embora inicialmente tenha sido idealizado o ensaio com $15\ \mu\text{m}$ de profundidade de mergulho, para comparação direta a profundidade de $14,3\ \mu\text{m}$ obtida no riscamento simples em esclerômetro, o ancoramento do grão abrasivo de diamante na ferramenta de usinagem definida não se mostrou resistente o suficiente. Todas as tentativas a tal profundidade resultaram em quebra da ferramenta e/ou amostra.

Devido à vibração natural da máquina retificadora, que gerava sinais de força muito superiores aos provenientes do ensaio, também ficou inviabilizada a medida de força deste. Assim sendo, qualquer interação proveniente da ferramenta com a amostra ficou mascarada dentro do ruído de força provocado pela própria máquina, e impossível

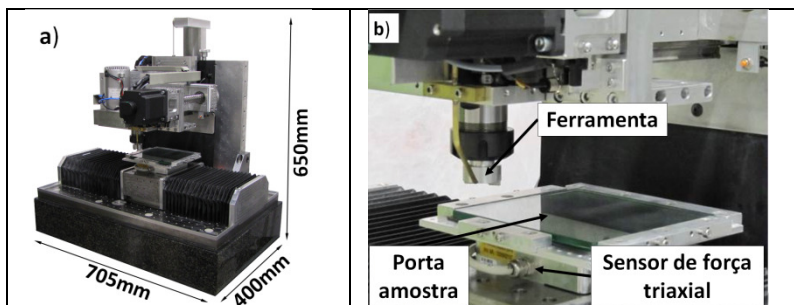
de ser identificada. Testes empregando acelerômetros foram executados, no intuito de separar os sinais de força, mas também sem sucesso.

3.4 ESCLERÔMETRO CNC

O esclerômetro CNC foi desenvolvido pela equipe parceira BRAGECRIM na Alemanha da *Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation / Technische Universität Kaiserslautern* (FBK/TU-KL). Este equipamento possui controle CNC de posição e movimento nos eixos do plano horizontal X e Y, controle de subida e descida do braço suporte da ferramenta, controle de velocidade de rotação e ângulo de rotação do porta ferramenta. As forças envolvidas durante a realização dos ensaios eram medidas diretamente na plataforma porta amostra por sensor triaxial, marca ME-Systeme, modelo K3D120. O software para aquisição digital do sinal gerado pelo sensor foi desenvolvido em plataforma LabView, sendo os resultados compilados em arquivo do tipo .txt, para então serem exportados para programa de cálculo em planilha digital. Durante a avaliação das forças envolvidas nos ensaios de riscamento, os dados foram inicialmente tratados no programa de planilha eletrônica para correção do marco zero do sensor. Para este fim, procedeu-se a medição da força triaxial por cerca de 2 segundos sem qualquer tipo de carga aplicada, para então a força média medida para cada eixo neste período ser subtraída dos valores a serem medidos posteriormente. A partir deste ponto, iniciou-se a análise do riscamento em si, onde estes foram separados por risco, computada a força média para os eixos X, Y e Z, e feita a média entre os nove riscos para a mesma condição.

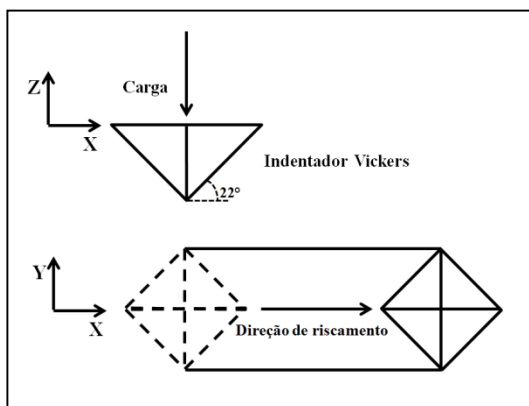
A carga foi aplicada a ferramenta através de peso morto acoplado diretamente no braço suporte da ferramenta. Deste modo, a ferramenta poderia acompanhar de forma contínua a superfície, mantendo a carga constante, ou seja, esclerometria por imposição de força. A Figura 33a mostra uma visão geral e dimensões aproximadas do esclerômetro, e a Figura 33b mostra em detalhe o porta amostra com o sensor triaxial para medição de força e pinça para suporte da ferramenta.

Figura 33: a) Visão geral do esclerômetro desenvolvido no FBK/TU-KL; b) Detalhe do porta amostra com o sensor triaxial para medição de força e pinça para suporte da ferramenta.



No intuito de simular o efeito de apenas um único grão abrasivo do rebolo de retificação durante o riscamento, foi utilizado indentador Vickers como ferramenta de corte. Para maior repetibilidade e facilidade na comparação dos resultados, o indentador foi posicionando em todos os ensaios realizados com a aresta como frente de corte conforme esquematizado na Figura 34.

Figura 34: Esquema exemplificando posicionamento da aresta de corte para o ensaio de riscamento.



3.4.1 Ensaio de riscamento empregando esclerômetro CNC

Como forma de analisar o processo de retificação plana de mergulho em escala laboratorial reduzida, e com maior controle das variáveis envolvidas, foi empregada a técnica de esclerometria CNC. Com esta foram realizados riscos frágeis semelhantes aos gerados durante o processo de retificação, mas com a possibilidade de serem separados e avaliados individualmente.

Todos os riscos foram realizados à velocidade constante de 5000 mm/min (0,0833 m/s), e com carregamento por peso morto de 10 N medido diretamente no sensor de força triaxial. A medição de força foi realizada à taxa de 1 kHz durante todo o teste. O comprimento do risco foi de 20 mm, e visando a estabilidade da máquina, foi ignorando para análise os 5 mm iniciais e 5 mm finais. Riscos subsequentes eram espaçados de no mínimo 7 mm, de modo a garantir que não houvesse qualquer interação entre os mesmos. Após o riscamento, as placas foram limpas utilizando jato de ar comprimido para remoção do cavaco gerado.

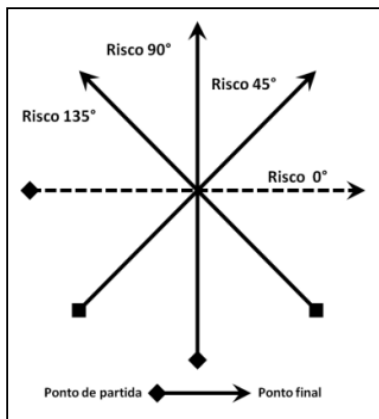
3.4.1.1 Riscamento simples

Para avaliação da força, largura e profundidade do risco individual, foram feitos riscos simples a 0° em relação ao eixo X do esclerômetro. Estes não possuíram qualquer tipo de risco próximo ou cruzamento que pudesse gerar interação, servindo como base de análise para o comportamento isolado do mesmo e posterior comparação.

3.4.1.2 Riscamento cruzado

Para avaliação da influência do ângulo de cruzamento entre os riscos na usinabilidade das placas cerâmicas, foram realizados riscamentos cruzados na superfície polida industrialmente utilizando o esclerômetro CNC. Quanto às variáveis de análise, foram estudados os cruzamentos de riscos com os ângulos de 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°, 105°, 120°, 135°, 150° e 165°, ou seja, sempre com incremento de 15° em relação à condição anterior. Como rotina a ser seguida, primeiramente era realizado o risco a 0° em relação ao eixo X do esclerômetro. Todos os riscos subsequentes tomavam este valor como referência para o ângulo a ser executado, conforme os exemplos apresentados na Figura 35 para os ângulos de 45°, 90° e 135°.

Figura 35: Configuração esquemática demonstrando sequência adotada para riscamento cruzado.



Vale destacar também que todos os ângulos estudados tinham seu par contrário, ou seja, para cada ângulo de riscamento com sentido concordante ao risco 0° , existe um ângulo com sentido discordante. Exemplificando o dito na sentença anterior: considerando o ângulo formado entre o risco 0° e os riscos cruzados com 45° e 135° , nota-se que ambos formam o mesmo ângulo em relação ao risco pré-existente, variando apenas o sentido. Esta afirmação também se aplica aos pares de ângulos 15° e 165° , 30° e 150° , e assim por diante.

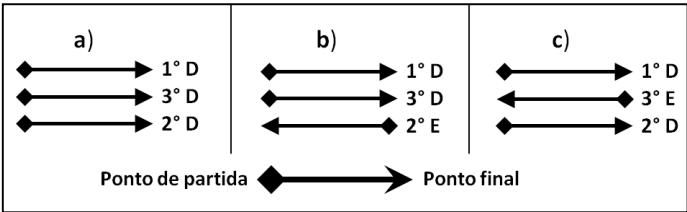
3.4.1.3 Riscamento paralelo

Para a avaliação da interação entre riscos paralelos com diferentes espaçamentos, e sentidos de riscamento, na usinabilidade das placas cerâmicas, foram realizados riscos na superfície polida industrialmente utilizando o esclerômetro CNC. Neste ensaio foram efetuados riscos paralelos com três configurações de sentido diferentes, conforme apresentado no Quadro 2 e esquematizados na Figura 36.

Quadro 2: Configurações de sentido empregadas no riscamento paralelo.

1D-3D-2D	1º risco no sentido da esquerda para direita
	3º risco no sentido da esquerda para direita
	2º risco no sentido da esquerda para direita
1D-3D-2E	1º risco no sentido da esquerda para direita
	3º risco no sentido da esquerda para direita
	2º risco no sentido da direita para esquerda
1D-3E-2D	1º risco no sentido da esquerda para direita
	3º risco no sentido da direita para esquerda
	2º risco no sentido da esquerda para direita

Figura 36: Configuração esquemática mostrando sequência de riscamento paralelo: a) configuração 1D-3D-2D; b) configuração 1D-3D-2E; c) configuração 1D-3E-2D.



Três espaçamentos distintos entre os riscos foram adotados, sendo este valor proveniente da relação 0,8 – 1,0 – 1,2 vezes a Largura média do Risco (L_R) simples. O valor de L_R foi determinado previamente no riscamento simples por microscopia óptica e posterior análise digital de imagens, como sendo 0,144 μm , deste modo $0,8 \cdot L_R = 0,115 \mu\text{m}$, $1,0 \cdot L_R = 0,144 \mu\text{m}$ e $1,2 \cdot L_R = 0,173 \mu\text{m}$.

Exemplificando com a legenda exposta na Figura 36b, quando realizado riscamento 1D–3D–2E com espaçamento de $0,8L_R$, o primeiro risco ocorreu no sentido da esquerda para a direita em relação ao eixo X do esclerômetro; segundo risco no sentido da direita para a esquerda paralelamente ao primeiro; terceiro risco no sentido da esquerda para a direita no meio dos dois primeiros. O espaçamento entre os riscos 1D–3D e 3D–2E foi $0,8$ vezes L_R , deste modo era desejado a sobreposição parcial entre os mesmos para este exemplo específico.

3.5 ANÁLISES

3.5.1 Perfilometria óptica

Para análise do perfil das cavidades geradas durante os testes de riscamento foi utilizada a técnica de perfilometria óptica 3D, empregando equipamento marca GFM, modelo MikroCAD. Para todas as análises, as amostras eram primeiramente limpas com jato de ar comprimido, niveladas sobre massa plástica com auxílio de prensa niveladora metalográfica, o risco em análise posicionado de forma transversal ao sentido da grade de sombras e a microfotografia feita com ampliação total de 30x. Foi empregada para efeitos de cálculos a média aritmética de cinco amostras, com cinco medições consecutivas e espaçadas em 100 μm , totalizando vinte e cinco medições para cada análise.

3.5.1.1 Avaliação da profundidade de riscamento

Para a computação da profundidade do riscamento e área transversal afetada para todos os ensaios, foi utilizada planilha eletrônica de cálculo. Nesta os dados foram tratados inicialmente para zeragem do plano da placa cerâmica em análise, onde se efetuava a medição com 0,5 mm de comprimento do nível da placa, sem que houvesse qualquer tipo de risco efetuado na referida linha em questão. O valor médio proveniente desta linha era então subtraído dos valores de profundidade a serem calculados na sequência.

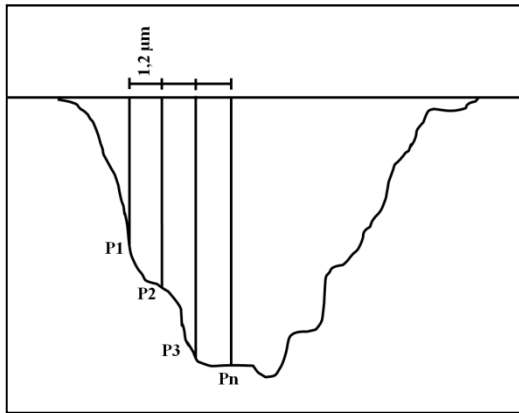
Após a zeragem, os dados de profundidade para as cinco réplicas de cada ensaio foram então separados um a um, para composição dos gráficos de profundidade, cálculo da profundidade máxima individual e área transversal trabalhada. De conhecimento destes valores, foram calculadas as médias gerais, que consistiam na média das cinco réplicas de cada condição de ensaio.

Foi calculada também a relação entre profundidade e largura média do risco empregando esclerômetro CNC com riscamento simples. Pois, considerando que o riscamento foi realizado com ferramenta de geometria definida (indentador Vickers), supunha-se que a cavidade gerada seguiria a forma piramidal da ferramenta. Deste modo, a partir do valor de profundidade máxima média, foi estimado o valor da largura do risco simples.

3.5.1.2 Área transversal afetada

Sendo $1,2\mu\text{m}$ o valor de passo digital do equipamento de medição no eixo X, conforme apresentado na Figura 37, e de conhecimento da profundidade no ponto em análise, foi realizado o cálculo de Área Transversal afetada (A_t) ponto a ponto por somatório conforme apresentado na Equação 12. No fim, foram somadas todas as áreas para composição da área transversal afetada para o referido risco. O mesmo procedimento foi repetido para análise do riscamento simples e paralelo empregando esclerômetro CNC, e riscamento empregando retificação plana.

Figura 37: Esquema representando método de cálculo da área transversal afetada em função do passo de medição e profundidade medida.



$$A_t = \sum_{i=1}^n P_n * 1,2\mu\text{m} \quad (12)$$

3.5.2 Microscopia óptica e análise digital de imagem

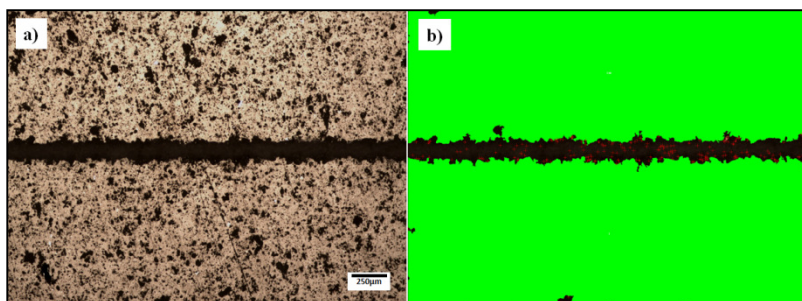
Para análise da área superficial afetada durante os ensaios de riscamento, foram feitas microfotografias ópticas, digitalizadas por câmera CCD acoplada ao equipamento, utilizando microscópio marca Olympus, modelo BX41M, com ampliação total de 100x, com Largura Horizontal de $2673,66\mu\text{m}$ (L_H) e Largura Vertical de $2005,25\mu\text{m}$ (L_V). Para todas as análises, as amostras eram inicialmente limpas com jato de

ar comprimido, niveladas sobre massa plástica com auxílio de prensa niveladora metalográfica, e então tinham o risco em análise posicionado de forma paralela ao eixo X da máquina.

Para a análise digital das imagens, foi utilizado o programa Buehler OmniMet Ver. 9.0 rev. 2b, sendo os limites de binarização ajustados individualmente pelo operador para cada amostra em análise.

O procedimento para determinação da Largura média do Risco (L_R), tanto para o riscamento empregando retificadora plana quanto esclômetro CNC, seguiu a rotina exemplificada na Figura 38a e Figura 38b. Nestas, a primeira apresenta a microfotografia da amostra, e a segunda a Área Não Trabalhada (A_{NT}) pelo riscamento, digitalmente demarcada em verde. A escolha da marcação de A_{NT} pelo programa de análise digital de imagens se deu por este apresentar melhores relações de contraste, o que facilitou a delimitação dos campos de análise.

Figura 38: a) Microfotografia de amostra com riscamento simples; b) Análise digital de imagem com marcação em verde da área não trabalhada (A_{NT}) pelo riscamento.



Após a identificação dos campos pelo programa, este computava automaticamente relatório contendo a Área Total da imagem (A_{Tt}) e A_{NT} . A Área Trabalhada (A_{Tb}) pelo riscamento era calculada diretamente pela diferença entre A_{Tt} e A_{NT} , conforme apresentado na Equação 13.

$$A_{Tb} = A_{Tt} - A_{NT} \quad (13)$$

Para determinação da Largura média do Risco (L_R), foram utilizadas nove amostras com apenas riscamentos simples, ou seja, com apenas um risco, sem cruzamento e amplamente espaçados. Nestes, sabendo que L_H é sempre 2673,66 μm, dividiu-se A_{Tb} por L_H para se ter

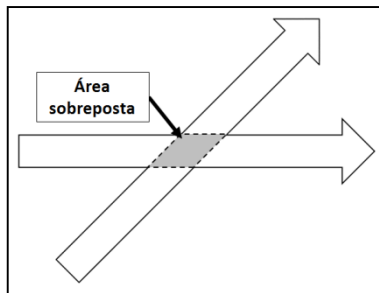
o resultado de largura média do risco, contabilizando todo o seu comprimento na microfotografia conforme Equação 14.

$$L_R = \frac{A_{Tb}}{L_H} \quad (14)$$

A partir da Equação 14, e da medição experimental da Área Trabalhada em riscamento com Retificadora (A_{Tr}), empregando a metodologia anteriormente exposta para determinação de A_{Tb} , foi determinado o valor de L_R para o risco em retificadora plana para avaliação da influência da velocidade de corte e tamanho do grão abrasivo.

Também foi determinado o valor de L_R para o riscamento em esclerômetro, sendo calculada a diferença entre a Área Trabalhada em riscamento Cruzado (A_{Tc}) medida por análise digital de imagem e a Área Trabalhada em riscamento Cruzado Teórica (A_{Tct}), para avaliação da influência do cruzamento entre riscos com diferentes ângulos. A_{Tct} é a área decorrente apenas da sobreposição de dois riscos sem qualquer tipo de interação, sendo desconsiderada do somatório a sobreposição do segundo risco, a fim de não computar em duplicidade a área apresentada em cinza tracejado na Figura 39. Para avaliação da A_{Tc} , foram utilizadas nove amostras para cada ângulo.

Figura 39: Representação esquemática para cálculo da área trabalhada em riscamento cruzado teórica (A_{Tct}), indicando área a ser descontada no somatório.



Para avaliação da influência do sentido e espaçamento no riscamento paralelo, foi inicialmente determinada a Área Trabalhada em riscamento Paralelo (A_{Tp}), também empregando metodologia idêntica à

aplicada para determinação de A_{Tb} . Neste foi computado o somatório da área dos três riscos efetuados sobre a amostra cerâmica, para então ser comparada com Área Trabalhada em riscamento Paralelo Teórica (A_{Tpt}), que representa a área supostamente trabalhada por três riscos quando da largura idêntica a L_R do ensaio em questão.

3.5.3 Avaliação da força no ensaio de riscamento paralelo

Para avaliação da força durante o riscamento paralelo foi utilizada planilha eletrônica de cálculo. Nesta os dados foram tratados inicialmente para zeragem do esclerômetro, onde se efetuava a medição por dois segundos das forças triaxiais, sem que houvesse qualquer tipo de carga sendo aplicada ao sensor. O valor médio proveniente deste período era então subtraído dos valores de força a serem calculados na sequência. Especificamente para o cálculo do atrito aparente durante os ensaios, foi calculada a soma vetorial das forças dos eixos X e Y, de modo que a força resultante no plano XY seja o valor a ser empregado como Força Tangencial (F_t).

Após a zeragem, os dados de força para as nove réplicas de cada ensaio foram então separados um a um, para cálculo da força individual, atrito aparente e composição dos gráficos. De conhecimento dos valores individuais, foram calculadas as forças médias gerais, que consistiam na média das nove réplicas de cada condição de ensaio.

3.5.4 Microscopia eletrônica de varredura

Devido à limitação apresentada pela técnica de microscopia óptica em analisar os riscos de forma ampla e com perspectiva de profundidade, foi empregada microscopia eletrônica de varredura para complementação da análise da área superficial afetada. As microfotografias foram feitas utilizando microscópio marca Quanta, modelo 600 FEG, com ampliação total indicada em cada microfotografia individualmente.

Para todas as análises, as amostras eram primeiramente limpas com jato de ar comprimido, metalizadas com ouro, e então tinham o risco em análise posicionado de forma paralela ao eixo X da máquina.

Apesar da qualidade visual das imagens geradas, estas não foram utilizadas para análise digital de imagens devido à dificuldade em se conseguir o contraste necessário entre os tons de cinza gerados pelo equipamento.

3.5.5 Avaliação dos modelos matemáticos propostos para remoção de material

Partindo dos modelos matemáticos propostos por Marshall & Evans, e Hutchings, sua representatividade foi avaliada em função da caracterização básica da placa cerâmica e resultados experimentais obtidos para o riscamento simples. A partir disto, foi avaliada a representatividade dos modelos matemáticos para estimar a quantidade de material removido por unidade de escoamento em comparação aos resultados obtidos experimentalmente durante o riscamento paralelo (Cavalcante, et al., 2003), (Evans, 1979), (Hutchings, 1992), (Stachowiak, 2005). Esta avaliação não pode ser realizada para os resultados obtidos com o ensaio em retificação plana, pois como já mencionado em tópico anterior, não foi possível determinar o valor da carga aplicada durante o ensaio.

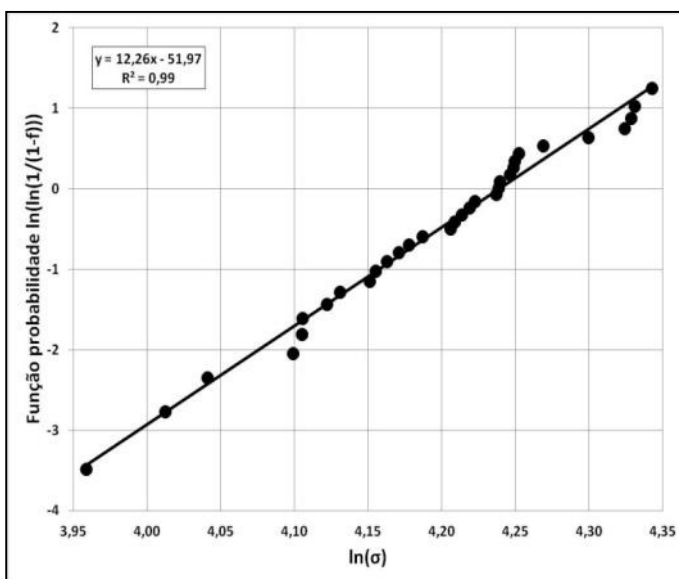
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO BÁSICA

4.1.1 Resistência mecânica por flexão a 4 pontos

Os resultados para resistência mecânica por flexão a 4 pontos são apresentados na Figura 40 na forma de diagrama de Weibull. Sendo a resistência média $66,7 \pm 6,0$ MPa, e o módulo de Weibull 12.

Figura 40: Diagrama de Weibull.



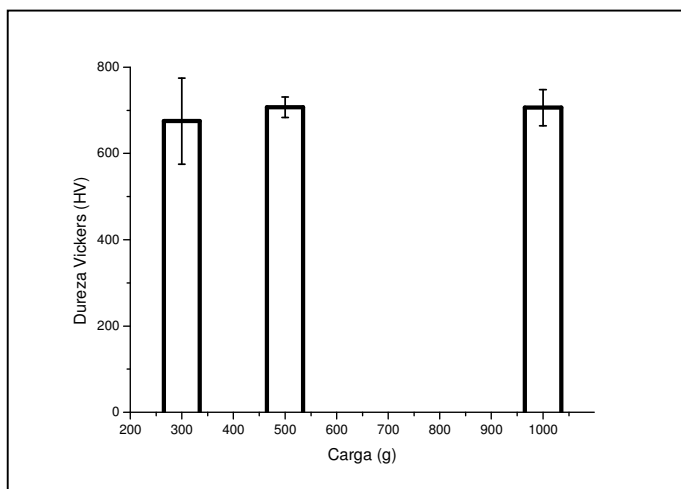
A placa cerâmica utilizada nos ensaios se mostrou de altíssima resistência mecânica se comparada a outras marcas de revestimento, superando em muito o pré-requisito mínimo recomendado de 35 MPa para revestimento cerâmico do tipo porcelanato (NBR 13818, 1997), (Cabral Jr., et al., 2010), (Menegazzo, et al., 2002).

4.1.2 Dureza Vickers

A avaliação de dureza média se mostrou condizente com os valores esperados para placas cerâmicas do tipo porcelanato baseado em

quartzo (Callister, 1999), (Sidjanin, et al., 2006), (Kim, et al., 2001). Os dados apresentados na Figura 41 mostram a influência da carga aplicada na dureza da amostra, onde o aumento da carga gera elevação do valor de dureza, fato condizente com o predito em literatura (Souza, 1982). Também é possível observar a estabilização do valor de dureza em aproximadamente 700 HV entre 500 e 1000 g, o que corrobora a realização dos ensaios de riscamento com esclerômetro CNC de forma estável na carga idealizada para o ensaio.

Figura 41: Dureza Vickers em função da carga aplicada.



4.1.3 Rugosidade

O ensaio obteve como rugosidade média (R_a) o valor de $0,256 \pm 0,150 \mu\text{m}$. Os relatórios completos para as três réplicas de análise estão apresentados no ANEXO A. De modo geral, a grandeza das irregularidades e cavidades medidas se apresentaram abaixo dos limites previstos em literatura (Parra B. S., 2006). Onde estas foram muito inferiores à profundidade de corte e largura do risco gerado durante o riscamento frágil, deste modo sua influência sob o comportamento do risco pode ser considerada irrelevante.

4.1.4 Brilho

Está análise obteve como média o valor de 68,8 G.U. de brilho, empregando fonte luminosa com ângulo de incidência de 60°. Este valor esta de acordo com o padrão industrial para que um porcelanato polido tenha a classificação de alto brilho, que se situa entre 65 e 70 G.U. de brilho superficial (Hutchings, et al., 2005).

4.1.5 Determinação de densidade aparente e real

Com as análises realizadas pelo LDCM/SENAI, foi determinada a densidade real por picnometria da placa de porcelanato em 2,78 g/cm³, e densidade aparente por imersão em mercúrio em 2,4 g/cm³. Empregando estes valores, e a Equação 10, foi determinado o percentual de porosidade da amostra em 13,7 %. Este valor superou um pouco a estimativa máxima indicada em literatura de 10 %, mas não prejudicou a realização do estudo proposto (Alves, 2009), (Alves, 2010). Os relatórios completos para as análise estão apresentados no ANEXO B e ANEXO C.

4.1.6 Caracterização do módulo de elasticidade (E) e tenacidade à fratura (K_{Ic})

Empregando cinco amostras para composição da média, foi determinado o valor médio de K_{Ic} e E sendo, respectivamente, 1,08 ± 0,06 MPa.m^{1/2} e 73,7 ± 16,5 GPa. Os valores apresentados são condizentes com placa cerâmica do tipo porcelanato baseada em quartzo, que possuem baixa tenacidade à fratura e alto módulo de elasticidade (Callister, 1999).

4.2 RISCAMENTO EMPREGANDO RETIFICADORA PLANA

4.2.1 Microscopia óptica e análise digital de imagem

Apesar do comportamento extremamente frágil do material de estudo durante os ensaios de riscamento, os riscos se apresentaram de forma serrilhada, relativamente contínuos e constantes. As bordas se mantiveram bem delimitadas, facilitando sua identificação por microscopia óptica, não apresentando variações de largura abruptas ou remoção de material apenas em áreas excepcionais.

Também não foram identificadas ilhas de área não trabalhada, remetendo a conclusão que esta é uma característica exclusiva da interação entre riscos, como apresentado no tópico 3.4.1.2 Riscamento cruzado.

Exemplo representativo da microfotografia para a configuração de riscamento com velocidade de 20 m/s e grão abrasivo de 100 μm , bem como do respectivo reconhecimento digital, está apresentado na Figura 42. Todas as demais microfotografias são apresentadas no APÊNDICE C. A partir dos dados de análise digital de imagem, foi calculada a largura média do risco para as quatro diferentes condições de processo estudadas conforme apresentado na Figura 43.

Figura 42: a) Imagem por microscopia óptica do riscamento em retificadora plana b) identificação digital de área não trabalhada.

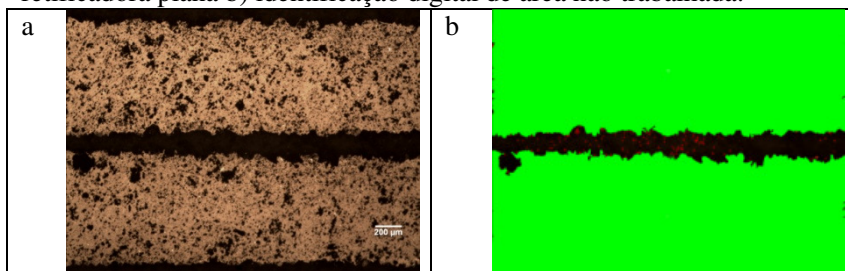
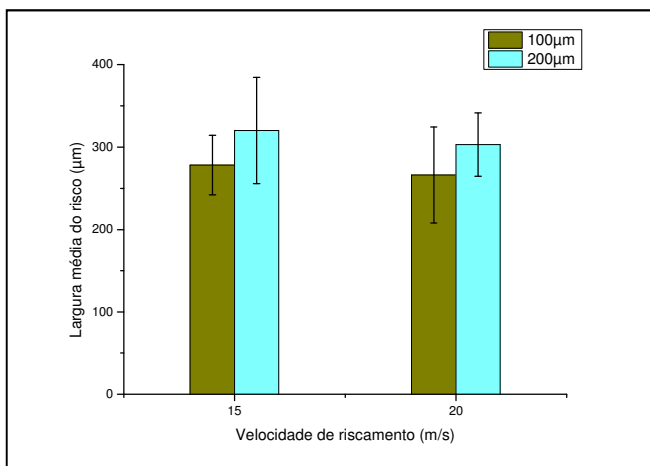
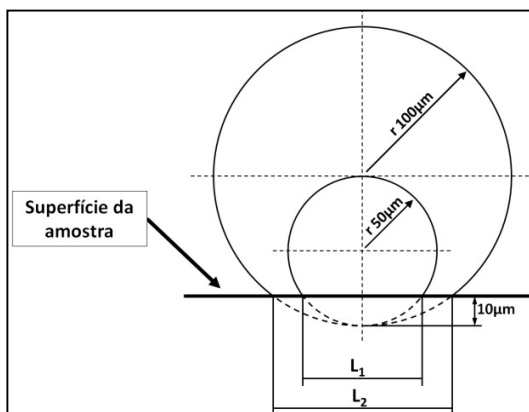


Figura 43: Largura média do risco em função da velocidade de riscamento e diâmetro médio do grão abrasivo.



Como previsto em literatura, o aumento do diâmetro médio do grão de diamante causou pequeno aumento recíproco na largura média do risco. Este tipo de comportamento se explica geometricamente, onde o aumento do diâmetro do grão abrasivo gera consequentemente um aumento da área de contato com a placa cerâmica, apesar de todos os ensaios empregarem a mesma profundidade de corte de $10\text{ }\mu\text{m}$. Na Figura 44 é apresentado modelo esquemático onde o grão abrasivo com diâmetro médio de $100\text{ }\mu\text{m}$ tem a corda de contato L_1 , e o grão abrasivo com diâmetro médio de $200\text{ }\mu\text{m}$ tem a corda de contato L_2 , sendo que L_2 é 45 % maior que L_1 . Em contrapartida, a variação entre os limites industriais de velocidade de corte, mostrou que com o aumento da velocidade de riscamento ocorreu uma leve diminuição da largura média do risco, sendo esta diferença inferior ao desvio padrão apresentado pelos riscos. Assim, admite-se que a alteração da velocidade de corte na retificação plana não gera influência efetiva na área afetada pelo riscamento.

Figura 44: Esquema representativo para área de contato dos grãos abrasivos com diferentes diâmetros.

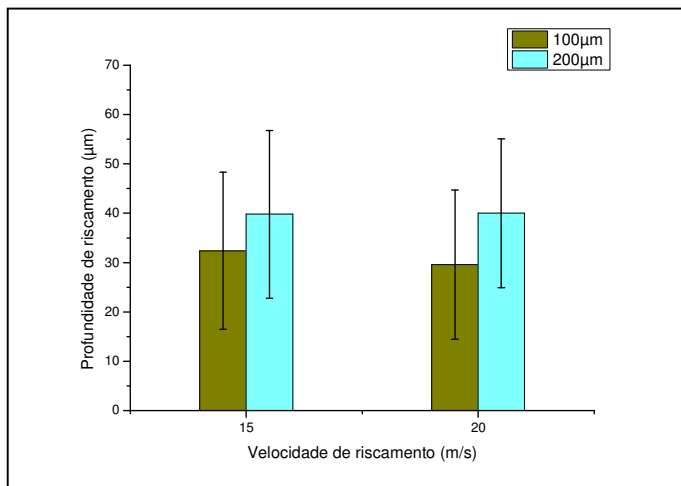


4.2.2 Avaliação da profundidade de riscamento

A partir do riscamento feito empregando retificação plana, foi identificada a influência dos parâmetros de processo na profundidade máxima do risco. A diferença mais evidente foi entre os diferentes tamanhos de grãos abrasivos adotados, onde a Figura 45 mostra que a

profundidade do riscamento aumenta de forma equivalente ao tamanho do grão.

Figura 45: Profundidade de riscamento em função da velocidade de riscamento e diâmetro médio do grão abrasivo.



Como discutido no tópico anterior, o aumento do diâmetro médio do grão de diamante gera aumento mútuo da área de contato com a superfície da amostra. Consequentemente, a força normal devido à interação entre o grão abrasivo e a placa, tende a crescer de intensidade juntamente com este. Portanto, com uma maior área de contato e força aplicada na amostra pelo abrasivo, maior também será o volume de material afetado e a quantidade de material removida de forma frágil durante a usinagem.

Novamente, a variação da velocidade de riscamento não apresentou variação significativa nos resultados obtidos. As diferenças apresentadas na Figura 45 são inferiores aos desvios padrões apresentados pelas médias dos mesmos. Deste modo, pode-se afirmar que a variação da profundidade em função da velocidade nas condições estudadas é irrelevante. Assim sendo, este evento segue de forma concordante à conclusão obtida no tópico anterior.

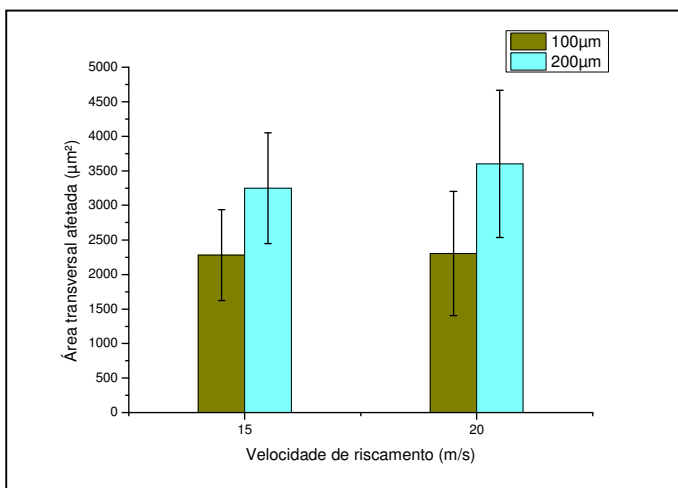
Apesar de a afirmação apresentada parecer ser conflitante ao que consta em literatura, onde se afirma que maiores velocidades de corte geram maiores remoções de material, na verdade esta explica e completa

o seu conceito (Richerson, 1992). Ao se desenvolver maior velocidade angular do rebolo, o aumento na remoção de material advém do aumento da relação de contatos abrasivos por tempo com a peça de trabalho, e não do aumento da remoção de material por risco individual. Com isto é possível aplicar maiores velocidades de avanço do rebolo, e obter maior produtividade.

4.2.3 Área transversal afetada

A análise da área transversal afetada para o riscamento em retificação plana mostrou comportamentos harmônicos aos resultados apresentados para largura e profundidade de riscamento, conforme apresentado na Figura 46. O aumento do diâmetro médio do grão abrasivo gerou aumento recíproco da área transversal afetada, sendo que o aumento de velocidade de riscamento gera pouca interferência no resultado. Este comportamento é decorrente das mesmas condições geométricas explicadas nos tópicos anteriores.

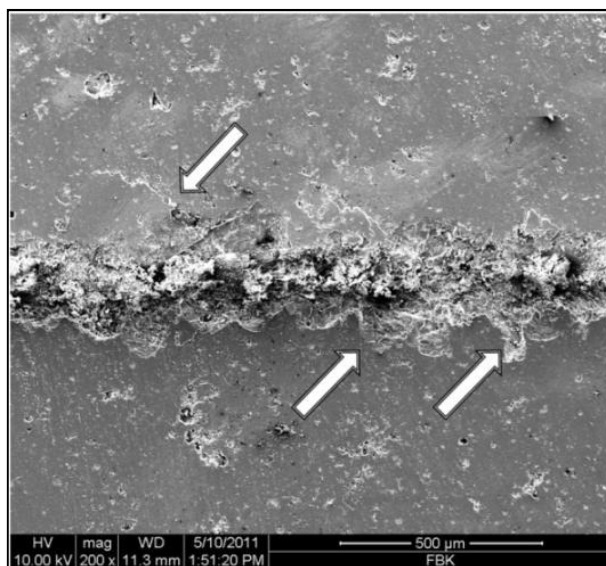
Figura 46: Área transversal afetada em função da velocidade de riscamento e diâmetro médio do grão abrasivo.



4.2.4 Microscopia eletrônica de varredura

Os riscos efetuados em retificadora plana apresentaram grande irregularidade na cavidade devido à remoção de material ser predominantemente por microlascamento (Ahn, 2003). A formação de defeitos adjacentes ao risco se mostrou evidente, remetendo a formação de trincas laterais conforme apresentado na Figura 47. Nota-se também, que em alguns casos, o destacamento de material ocorreu de forma incompleta, restando pequenas porções de cavaco fracamente aderidas à superfície da amostra conforme indicado pela seta superior na Figura 47.

Figura 47: Imagem por microscopia eletrônica de varredura da superfície da amostra de porcelanato com riscamento por retificação plana. Setas brancas indicando trincas laterais, com provável afloramento a superfície. Configuração de ensaio: grão abrasivo de 100 μm de diâmetro médio, velocidade de corte de 15 m/s e profundidade de mergulho de 10 μm .



Quando empregado grão abrasivo de 100 μm , o início e fim dos riscos apresentaram pequena parcela de deformação plástica (usinagem dúctil) conforme apresentado na Figura 48, e em maior detalhe na Figura 49. Este comportamento ocorre principalmente porque no início do corte

por retificação, a profundidade de corte do grão abrasivo aumenta gradativamente a partir do contato, profundidade zero, até a profundidade máxima de interferência de 10 μm . Considerando que a parcela dúctil ocorreu pelo comprimento de aproximado de 350 μm , ao fim deste, a profundidade penetração é da ordem de 0,3 μm . Deste modo, é admissível, que tal parcela diminuta de deformação plástica ocorra, e com a evolução do risco e o aumento gradativo da profundidade de penetração do grão abrasivo na peça, ocorra à mudança do mecanismo de desgaste de leve para severo, executando a usinagem frágil por microlascamento. Este tipo de comportamento também foi identificado em literatura para a usinagem de alumina e carbetto de silício, desde que respeitadas às condições de processos necessárias para abrasão leve (Stachowiak, 2005). Esta condição de ensaio e comportamento do material remete analogamente ao ensaio de dureza ao risco, onde com o aumento gradativo da carga e/ou profundidade de penetração da ferramenta abrasiva na amostra, é possível delimitar a fronteira entre usinagem dúctil e frágil em função dos parâmetros de ensaio aplicados.

Este evento foi mais pronunciado quando a velocidade de corte empregada foi de 20 m/s, embora também esteja presente de forma reduzida quando do ensaio a 15 m/s. As amostras ensaiadas com grão abrasivo de diâmetro médio de 200 μm não apresentaram sinais de usinagem dúctil em sua totalidade.

Figura 48: Imagem por microscopia eletrônica de varredura da superfície da amostra de porcelanato com riscamento por retificação plana. Arco negro mostrando início do risco com pequena parcela de deformação plástica. Configuração de ensaio, grão abrasivo de 100 μm de diâmetro médio, velocidade de corte de 20 m/s e profundidade de mergulho de 10 μm .

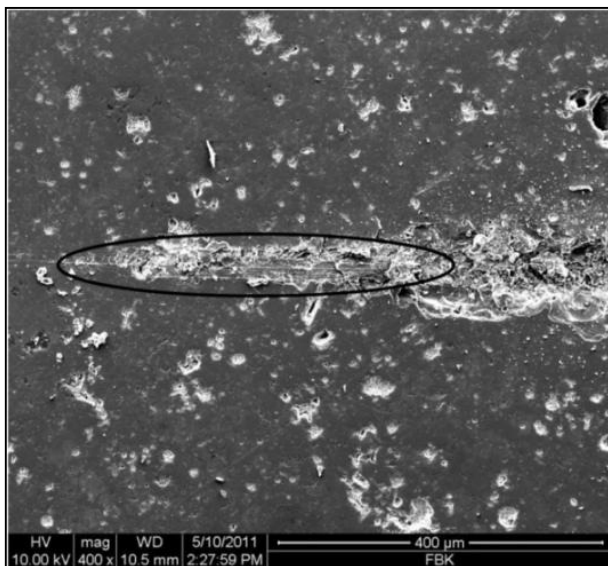
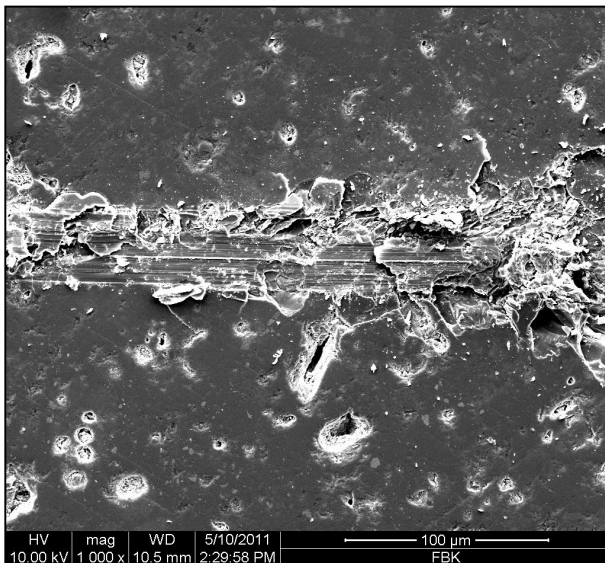


Figura 49: Imagem por microscopia eletrônica de varredura da superfície da amostra de porcelanato com riscamento por retificação plana. Em detalhe, zona com deformação plástica. Configuração de ensaio: grão abrasivo de 100 μm de diâmetro médio, velocidade de corte de 20 m/s e profundidade de mergulho de 10 μm .



Especificamente para o ensaio na configuração com grão abrasivo de 200 μm , foi observada a aderência de material metálico da ferramenta de corte no decorrer do riscamento. Fato confirmado através de análise de energia dispersiva (EDS), mas por limitações operacionais do equipamento, não foi possível gerar relatório para tal. Este evento se deve provavelmente ao atrito entre o metal de suporte do grão de diamante na ferramenta e a superfície da amostra, sendo visualizado na Figura 50 e em maior detalhe na Figura 51.

Figura 50: Imagem por microscopia eletrônica de varredura da superfície da amostra de porcelanato com riscamento por retificação plana. Seta branca indicando aderência de material da ferramenta de corte na superfície do corpo de prova. Configuração de ensaio: grão abrasivo de $200\text{ }\mu\text{m}$ de diâmetro médio, velocidade de corte de 20 m/s e profundidade de mergulho de $10\text{ }\mu\text{m}$.

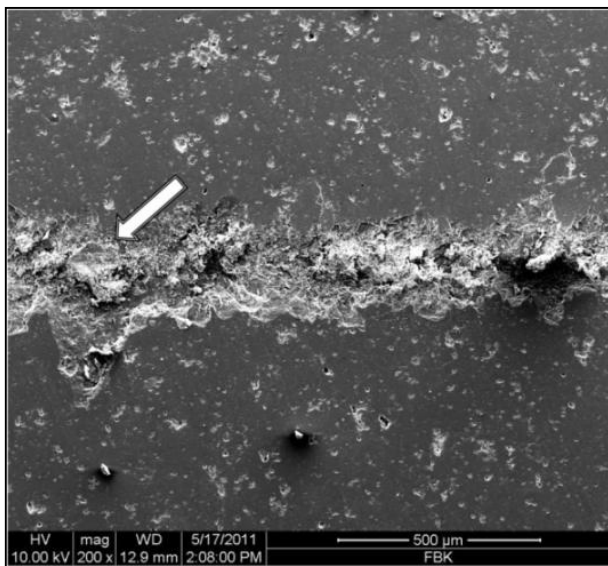
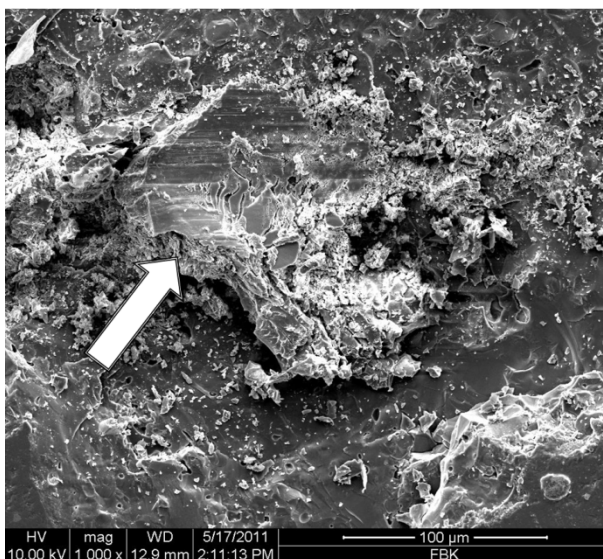


Figura 51: Imagem por microscopia eletrônica de varredura da superfície da amostra de porcelanato com riscamento por retificação plana. Em detalhe, aderência de material da ferramenta de corte na superfície do corpo de prova. Configuração de ensaio: grão abrasivo de 200 μm de diâmetro média, velocidade de corte de 20 m/s e profundidade de mergulho de 10 μm .



4.3 RISCAMENTO EMPREGANDO ESCLERÔMETRO CNC

4.3.1 Microscopia óptica e análise digital de imagem

O riscamento utilizando como ferramenta abrasiva indentador Vickers provocou riscos com largura contínua e constante, muito semelhante ao riscamento executado em retificadora plana. Este também não apresentou variações abruptas de dimensão ou remoção de material em zonas isoladas. Baseado nestas e outras similaridades apresentadas adiante, admitiu-se que tal técnica pode ser utilizada como forma laboratorial e controlada para estudo do processo de retificação plana de mergulho.

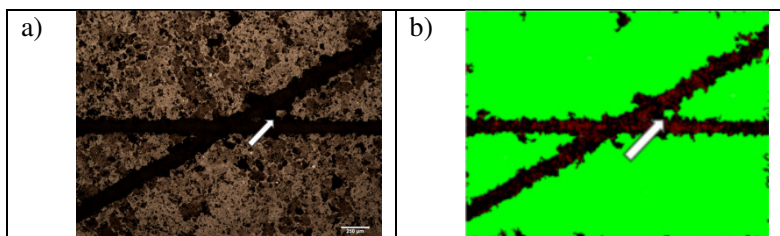
4.3.1.1 Riscamento simples

Começando a discussão com o riscamento a 0° empregando o esclerômetro para determinação da largura média do risco, foi observado que $A_{NT} = 4983181 \mu\text{m}^2$, fazendo uso da Equação 13 e Equação 14 foi calculado que $L_R = 141 \pm 10 \mu\text{m}$. Este valor de L_R foi utilizado como base para todos os cálculos subsequentes e riscamentos empregando esclerômetro CNC.

4.3.1.2 Riscamento cruzado

Analisando os riscos cruzados com onze diferentes ângulos, os cruzamentos puderam ser claramente identificados e diferenciados pelo sistema de análise digital de imagem. Sua identificação e contabilização precisaram de pouca ou nenhuma interferência do operador para marcação da área não trabalhada. Em alguns casos específicos, ocorreram pequenas ilhas de área não trabalhada na superfície da placa, onde o operador do microscópio precisou intervir ativamente para que esta fosse contabilizada. A ocorrência destas foi de forma aleatória para todos os ângulos estudados, tendo como exemplos representativos as zonas indicadas pelas setas nas Figura 52a e Figura 52b. Exemplos da imagem original para todos os ângulos estudados, e subsequente identificação por análise digital, são apresentados no APÊNDICE D

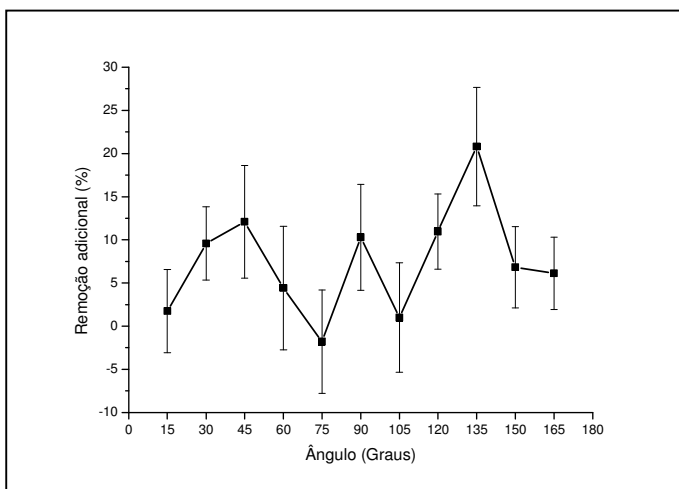
Figura 52: a) Imagem por microscopia óptica do para riscamento cruzado com 30° , b) identificação digital de área não trabalhada para riscamento cruzado com 30° . Ambas as figuras com seta indicativa de ilhas de área não trabalhadas.



Com os dados provenientes das análises digitais de imagem, foi contabilizada a área trabalhada em riscamento cruzado para todas as imagens, e a partir da média dos valores foi feita a comparação com a

área trabalhada em riscamento cruzado teórica. Com isto, pode-se montar o gráfico apresentado na Figura 53, que representa a remoção adicional de material da superfície devido a cruzamento entre riscos em comparação percentual ao que seria esperado para dois riscos amplamente espaçados e sem qualquer tipo de interação. Neste é possível identificar claramente a influência do ângulo de riscamento na remoção de material.

Figura 53: Remoção adicional de material em função do ângulo de cruzamento na usinagem frágil de placa cerâmica do tipo porcelanato.

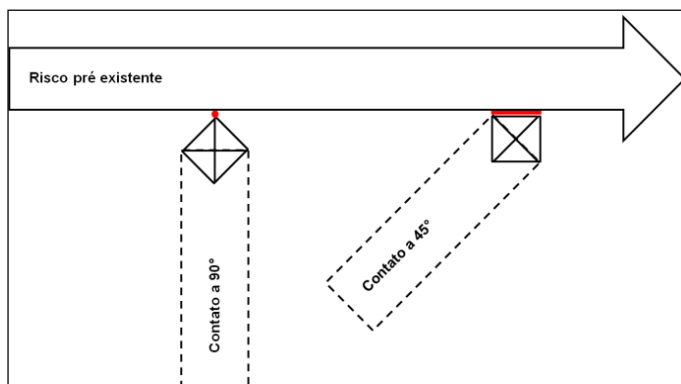


De modo geral, a maioria dos ângulos apresentou algum tipo de influência significativa e positiva na remoção superficial, ou seja, interferiu de forma favorável na usinabilidade do material. Os ângulos de cruzamento com 45° e 135° apresentaram a maior tendência positiva entre as variáveis estudadas, onde afetaram respectivamente área com 12,1 e 20,8 % maior do que seria esperado apenas pela soma de dois riscos individuais, sem interferência entre si, e amplamente distantes. Os ângulos de 75° e 105° tiveram valores de remoção adicional muito próximo à zero, sendo que apresentaram grande parcela de seus desvios no campo negativo de remoção. Assim sendo, tais ângulos devem ser evitados, pois geram quedas de produtividade quando empregados. Baseado nos resultados apresentados, pode-se indicar que, quando do projeto de novo maquinário para usinagem frágil de placas cerâmicas do

tipo porcelanato, as trajetórias a serem executadas durante a oscilação lateral da máquina favoreçam cruzamentos de 45° , 90° , e principalmente, 135° . Em contrapartida, devem ser evitados os ângulos de 75° e 105° .

Fato que deve ser considerado durante a avaliação dos resultados apresentados na Figura 53, é a relação entre a geometria da ferramenta de usinagem com a frente de contato durante o cruzamento dos riscos. Sabendo que o ângulo formado pelas faces do indentador Vickers é de 90° , e que os riscos foram sempre realizados empregando a aresta como frente do movimento, durante o cruzamento com 90° , o primeiro contato entre ferramenta e o risco pré-existente ocorre de forma pontual. Quando o ângulo em estudo é de 45° ou 135° , o primeiro contato com o risco pré-existente ocorre com a face do diamante, conforme esquematizado na Figura 54. Deste modo, durante a variação do ângulo no decorrer do ensaio, ocorre à mudança gradativa de contato pontual para contato de face. Consequentemente, o resultado obtido pode estar carregando uma identidade em função da geometria da ferramenta empregada.

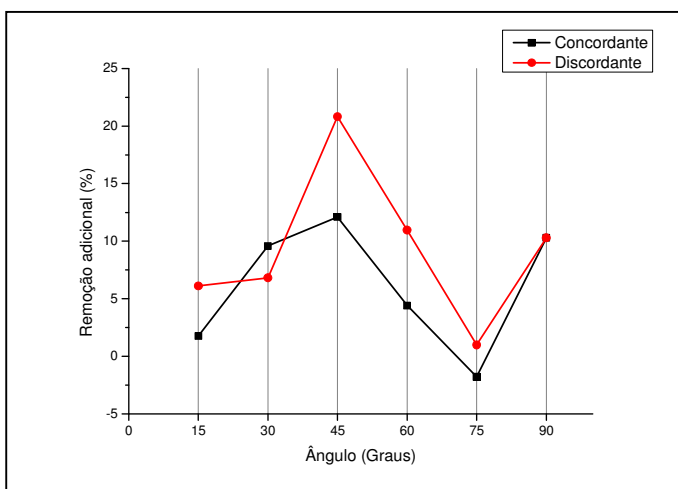
Figura 54: Esquema representativo para forma de contato da ferramenta de usinagem em função do ângulo de cruzamento. Região em vermelho explicitando a área de contato.



Mas, apesar da possível tendência na interpretação dos dados citada no parágrafo anterior, as comparações diretas entre os pares de ângulos mostram que cruzamentos com sentidos opostos, ou seja, discordantes, geram remoções superiores de material quando comparados ao seu par de sentido concordante, conforme apresentado na Figura 55. Assim sendo, a influência promovida pelos ângulos de 90° e

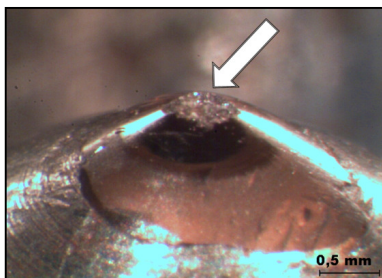
135° ainda podem ser consideradas a forma otimizada para cruzamentos de riscos durante a usinagem frágil de placas cerâmicas do tipo porcelanato.

Figura 55: Comparação entre pares de ângulos concordantes e discordantes em função da remoção adicional de material.



Como contra prova ao riscamento cruzado utilizando indentador Vickers, e sobretudo com a intenção de eliminar a influência da geometria deste nos resultados obtidos, ensaios foram realizados empregando indentador cônico do tipo Rockwell C. Devido à falta de agressividade de corte deste tipo de indentador, cargas da ordem de 10 N não causaram riscos frágeis. Isto se deve principalmente ao raio de arredondamento normatizado da ponta cônica em aproximadamente 0,2 mm, sendo um gume sem corte quando comparado à aresta do indentador Vickers. O aumento gradual da carga, na tentativa de gerar risco frágil, ocasionou a quebra da ponta do indentador em aproximadamente 20 N conforme apresentado na Figura 56. Esta quebra se repetiu tanto no teste realizado no esclerômetro CNC localizado no FBK/TU-KL, quanto no esclerômetro desenvolvido no LMP/UFSC (Gellert, 2010).

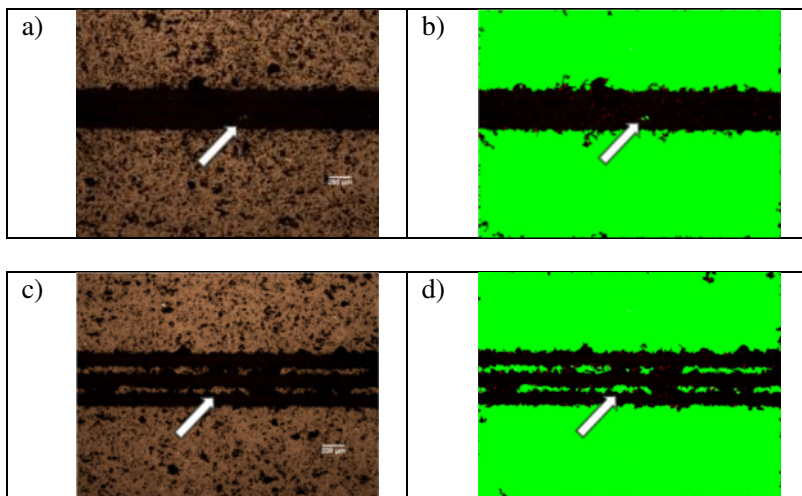
Figura 56: Indentador Rockwell C fraturado após ensaio de riscamento frágil. Seta indicando ponta fraturada.



4.3.1.3 Riscamento paralelo

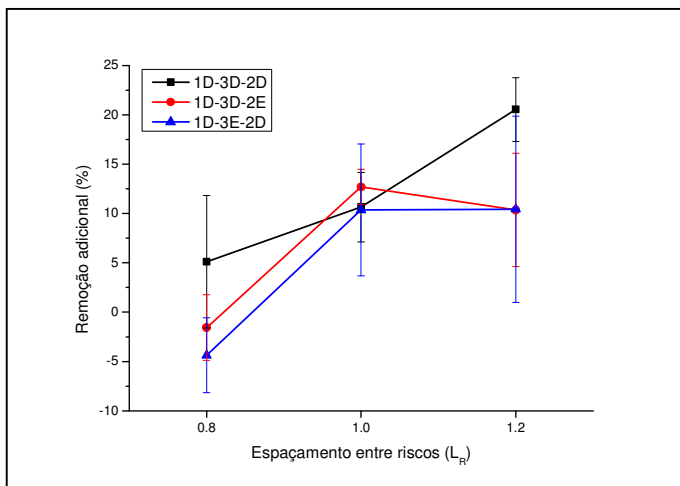
No estudo do riscamento paralelo, a análise digital de imagens também foi favorecida pela boa delimitação de borda e contraste em microscópio. Como era esperado, principalmente para os riscos com espaçamento de $1,2L_R$, ocorreram várias ilhas de área não trabalhada entre os mesmos. Estas tornaram-se praticamente inexistentes quando do riscamento com $0,8L_R$, visto que nesta situação ocorre a sobreposição parcial do riscamento e remoção quase que total das ilhas remanescentes. Na Figura 57 são apresentados dois exemplos representativos para os espaçamentos acima mencionados, onde com $0,8L_R$ são identificadas poucas e minúsculas ilhas de área não trabalhada, e com $1,2L_R$ a identificação é fácil e repetitiva durante todo o comprimento da imagem devido ao seu tamanho e continuidade. Exemplos da imagem original para todos os riscamentos paralelos com os diferentes sentidos e espaçamentos estudados, com subsequente identificação por análise digital, são apresentados no APÊNDICE E.

Figura 57: Imagem por microscopia óptica e identificação digital de área não trabalhada em riscamento paralelo, com seta indicativa de ilhas não trabalhadas; a) e b) 1D-3D-2E espaçamento $0,8L_R$; c) e d) 1D-3D-2E espaçamento $1,2L_R$.



Com os dados provenientes das análises digitais de imagem, foi contabilizada a área trabalhada em riscamento paralelo para todas as imagens, e a partir da média dos valores foi feito a comparação com a área trabalhada em riscamento paralelo teórica. Com isto, pode-se elaborar o gráfico apresentado na Figura 58, que representa a remoção adicional de material da superfície devido à interação entre riscos paralelos em comparação percentual ao que seria esperado para três riscos amplamente espaçados e sem qualquer tipo de interação. Neste, é possível verificar claramente tanto a influência do sentido de riscamento, como do espaçamento na remoção de material.

Figura 58: Remoção adicional de material em função do sentido de riscamento e espaçamento para riscos paralelos.



Os resultados apresentados na Figura 58 podem ser válidos tanto no projeto de novo ferramental abrasivo, quanto para a trajetória de novos equipamentos a serem empregados na usinagem frágil de placas cerâmicas do tipo porcelanato.

A interpretação quanto ao espaçamento entre os riscos remete analogamente a distância entre os grãos abrasivos do rebolo de retificação. Observando os resultados para o espaçamento de $0,8L_R$, é constatado que este reduz a usinabilidade até índices negativos de remoção adicional. Isto se deve principalmente à sobreposição de trajetórias, sendo que riscamentos paralelos subsequentes não efetuam a remoção de material. Deste modo, recomenda-se que o livre caminho médio entre as partículas que constituem o rebolo abrasivo não seja inferior à largura do risco gerado por este na condição de processo.

Considerando o outro limite do gráfico, o espaçamento de $1,2L_R$ foi o que apresentou a maior remoção adicional de material para todas as configurações de sentido de riscamento estudadas. Nesta condição, devido aos riscos iniciais fragilizarem suas adjacências, o risco final tende a remover maior volume de material por usinar uma superfície agora com trincas provenientes dos riscos anteriores. Até mesmo removendo material da área entre riscos que supostamente não seria afetada pela ferramenta durante a usinagem. Entretanto, este também foi

o que apresentou a maior quantidade de ilhas de material não removido, necessitando obrigatoriamente de segundo passe de retificação para sua remoção. Considerando o trabalho desenvolvido por Pinho (2011), acredita-se que espaçamentos superiores a $1,2L_R$ irão gerar ilhas de área não trabalhada ainda maiores, e necessitar de mais passes subsequentes de ferramenta para remoção destas (Pinho, 2011). Em trabalho semelhante realizado por Groenou (1979), também foi identificado que a remoção de material é dependente do espaçamento entre riscos, bem como, da carga aplicada na ferramenta. Neste estudo, foi empregando MnZn como amostra de análise, os picos de remoção de material para riscos paralelos ocorreram quando do espaçamento entre riscos de 50 e 100 μm para as cargas de 1,2 e 4,9 N, respectivamente (Groenou, et al., 1979).

Então para que uma ferramenta, durante a usinagem frágil de porcelanatos, tenha sua função otimizada, recomenda-se que esta tenha o livre caminho médio entre seus grãos de $1,0L_R$ até $1,2L_R$. Esta concepção tem como finalidade a obtenção da maior remoção de material, com a menor formação de ilhas de área não trabalhada possível.

Quando analisando os diferentes sentidos de riscamento estudados, as conclusões apresentadas se aplicam no projeto maquinário de usinagem e na trajetória do grão abrasivo a ser imposto por este. Na Figura 58 é mostrada a diferença de comportamento entre os diferentes sentidos, prevalecendo a configuração 1D-3D-2D como aquela em que ocorre a maior remoção adicional de material. Este tipo de trajetória, onde todos os riscos são efetuados no mesmo sentido, é típico do processo de retificação plana, e não demandaria qualquer tipo de alteração no maquinário atualmente empregado na indústria para tal operação. Os outros dois tipos de combinações de sentido de riscamento estudados, de modo geral, apresentaram valores inferiores ou semelhantes ao desenvolvido pela configuração 1D-3D-2D. Na curva da configuração 1D-3D-2E ocorreu um ponto destoante, referente ao espaçamento entre riscos de $1,0L_R$, sendo este provavelmente consequência de oscilações no esclerômetro CNC devido aos problemas de atrito nas guias ocorridos durante o decorrer dos ensaios. Vale ressaltar que para se aplicar as configurações de riscamento 1D-3D-2E e 1D-3E-2D em maquinário industrial, seriam necessárias várias adaptações construtivas nas máquinas atualmente empregadas. Essas observações apenas corroboram a afirmativa de que riscos paralelos sucessivos, empregando sempre o mesmo sentido de riscamento, é a

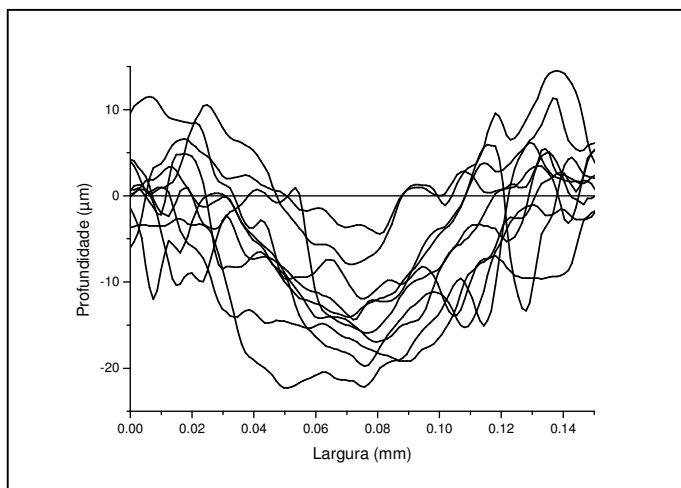
forma otimizada de usinagem frágil para placas cerâmicas do tipo porcelanato.

4.3.2 Perfilometria óptica

4.3.2.1 Avaliação de profundidade no riscamento simples

Usando vinte e cinco medições em amostras com apenas um único risco, ou seja, riscamento com ângulo de 0° em relação ao eixo X do esclerômetro, foi determinado a média da profundidade máxima do risco em $14,3 \pm 5,0 \mu\text{m}$. A Figura 59 apresenta o perfil de profundidade para dez das vinte e cinco cavidades examinadas, de onde foram retirados os valores para cálculo da profundidade máxima média. Vale também destacar que as cavidades apresentaram pequenas diferenças mensuráveis entre si, tanto para largura quanto para profundidade máxima. Este tipo de comportamento já era esperado, em decorrência da fragilidade do material em estudo e da agressividade dos parâmetros de usinagem empregados.

Figura 59: Perfil da profundidade do riscamento com um único risco empregando esclerômetro.



Considerando que o riscamento foi feito empregando indentador Vickers como ferramenta de corte e que a cavidade gerada teria forma

análoga ao perfil deste, a partir dos dados de profundidade máxima foi calculada a largura média do risco em $100,1 \mu\text{m}$. Comparando o valor calculado com o realmente medido por análise digital de imagens, ficou evidente que o dano superficial gerado supera em 29,2 % a zona de contato. Assim sendo, é possível admitir que mecanismos de propagação de danos, possivelmente trincas laterais, estão presentes durante o riscamento frágil de placas cerâmicas do tipo porcelanato e geram aumento da área superficial afetada.

4.3.2.2 Área transversal afetada em riscamento simples

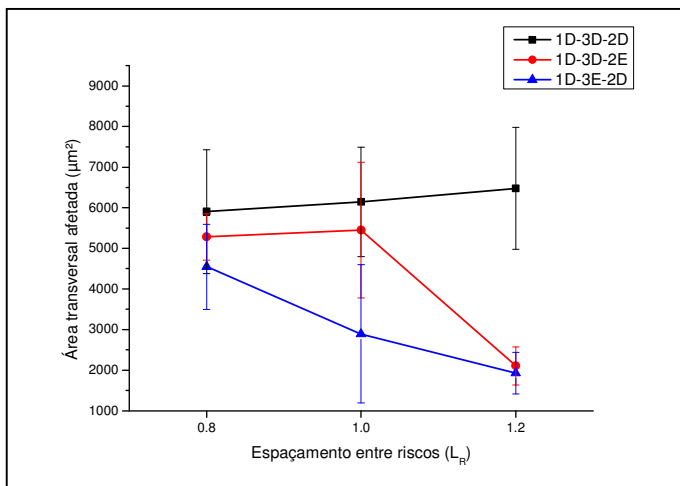
Para início da avaliação, a área transversal afetada foi medida por perfilometria óptica após o riscamento simples empregando esclerômetro CNC. O valor médio apresentado foi de $842,5 \pm 490,7 \mu\text{m}^2$. A partir destes valores, foram calculadas as estimativas para comparação com o riscamento paralelo.

Apesar da variação da área afetada ser bastante alta, tal valor era aguardado e condiz com a irregularidade do perfil da cavidade. Maiores discussões sobre as origens de tal comportamento são apresentadas em maior detalhe nos tópicos de 4.3.3 Análise de força durante o riscamento com esclerômetro CNC e 4.3.4 Microscopia eletrônica de varredura, onde é possível visualizar em maior definição o perfil da cavidade e exemplificar os fatores que levaram a tal condição.

4.3.2.3 Área transversal afetada em riscamento paralelo

As análises para o riscamento paralelo mostraram, de forma clara, tanto a influência do espaçamento quanto da configuração do sentido de riscamento, na área transversal afetada, conforme apresentado na Figura 60. A configuração 1D-3D-2D foi a que apresentou o melhor desempenho entre todas as configurações estudadas, mantendo sempre os maiores valores de área. Vale notar que esta também foi a única configuração que sempre manteve taxa crescente de remoção com o aumento do espaçamento entre os riscos. Já as configurações 1D-3D-2E e 1D-3E-2D apresentaram grande queda de área transversal afetada quando do espaçamento $1,2L_R$, sendo esta queda presente inclusive no espaçamento de $1,0L_R$ na configuração 1D-3E-2D. O aumento do espaçamento se mostrou como um redutor da área afetada, exceto para a condição acima mencionada.

Figura 60: Área transversal afetada em função do sentido de riscamento e espaçamento para riscos paralelos



Outra forma de avaliação da interação entre riscos é a comparação com a área transversal afetada medida no riscamento simples. Supondo que o somatório de três riscos paralelos deverá fornecer resultado proporcional, era esperado que cada configuração tivesse o valor de $2.527,5 \mu m^2$ aproximadamente ($3 \times 842,5 \mu m^2$). Observando a Figura 60, é possível identificar nitidamente que as configurações 1D-3D-2E e 1D-3E-2D se aproximam muito deste valor quando do espaçamento de $1,2L_R$. Já quando o espaçamento aplicado foi de $0,8L_R$, a interação entre riscos se mostrou de forma marcante para todas as configurações estudadas, elevando a área afetada para 4.500 até $6.000 \mu m^2$, ou seja, aproximadamente o dobro do valor esperado. Com o aumento do espaçamento, esta interação permaneceu exercendo influência na área transversal afetada apenas para a configuração 1D-3D-2D.

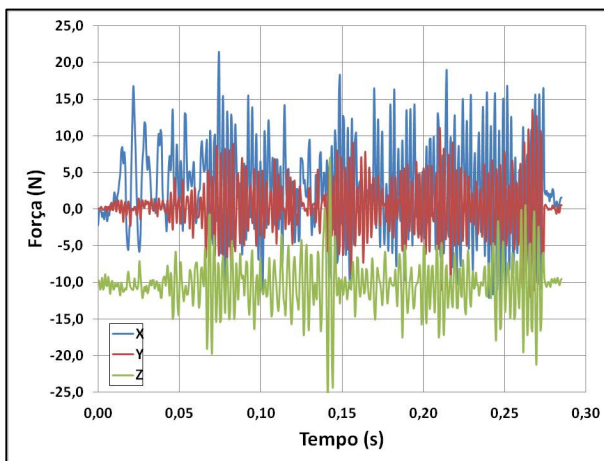
Novamente, em concordância aos resultados e explicações apresentadas em outras análises, a forma otimizada de remoção de material se dá quando do emprego da configuração de riscamento paralelo 1D-3D-2D, com espaçamento entre riscos de $1,0L_R$ até $1,2L_R$. Seja este último obtido pela trajetória desenvolvida pelo ferramental abrasivo, bem como pelo livre caminho médio entre seus grãos abrasivos.

4.3.3 Análise de força durante o riscamento com esclerômetro CNC

4.3.3.1 Riscamento simples

De forma geral, todos os riscamentos se comportaram de forma semelhante, podendo ser exemplificados pelo gráfico de força apresentado na Figura 61. Neste fica evidente a oscilação do sinal de força durante todo o ensaio, característica típica para riscamento em materiais frágeis. É perceptível também a formação de pequenos ciclos na medição da força do eixo X, com duração aproximada de 0,025 a 0,050 s. Acredita-se que estes sejam causados pela forma como ocorre a remoção de material, que ocorre de forma comparável ao fenômeno de *stick-slip* (Evans, 1979). Este comportamento se inicia com o carregamento da frente de usinagem da amostra pelo gume de corte da ferramenta, devido à incapacidade da amostra de se deformar plasticamente, esta fratura de forma frágil e abre uma cratera sem material. Com a continuidade do movimento da ferramenta, esta se desloca livremente sobre a cratera até encontrar nova frente de usinagem, onde ao fim do trajeto ocorre o impacto e pico de força. A partir deste ponto, a sequência de fenômenos se repete por todo o comprimento do risco, com carregamento – fratura – deslocamento livre – impacto.

Figura 61: Gráfico de força para o riscamento simples.



Empregando nove amostras diferentes para composição da média, a força aplicada média foi de 9,68 N no eixo Z, 2,72 N no eixo X e 0,45 N no eixo Y. Analisando os valores apresentados, inicialmente é possível observar que a carga aplicada está muito próxima à idealizada para o ensaio. Assim sendo, o sistema de carregamento por peso morto acoplado ao braço da máquina satisfaz as necessidades de ensaio. Quando analisado os eixos do plano de movimento, é possível observar a resistência ao riscamento da placa pela força apresentada no eixo X. Com isso, foi estimada a relação de atrito aparente em 0,28. Fato que merece destaque é o valor apresentado para a força do eixo Y, que supostamente deveria ser muito próximo ao valor zero. Acredita-se que esta diferença seja ocasionada por quatro fontes de erro principais:

- Erro de alinhamento entre o sensor triaxial de força e as guias de movimentação no eixo X;
- Erro de alinhamento da ferramenta que empregava a aresta do indentedor Vickers como gume de corte, podendo esta estar tocando a amostra com parte de sua face;
- Aleatoriedade da frente de usinagem durante o riscamento, principalmente após o microlascamento da amostra.
- Heterogeneidade da amostra, como a presença de poros, partículas de quartzo e danos subsuperficiais remanescentes devido aos riscos da usinagem industrial, conforme apresentado na Figura 62, Figura 63 e Figura 64 respectivamente;

Figura 62: Imagem por microscopia óptica da superfície da amostra de porcelanato. Porosidade superficial visíveis na forma de pontos escuros.

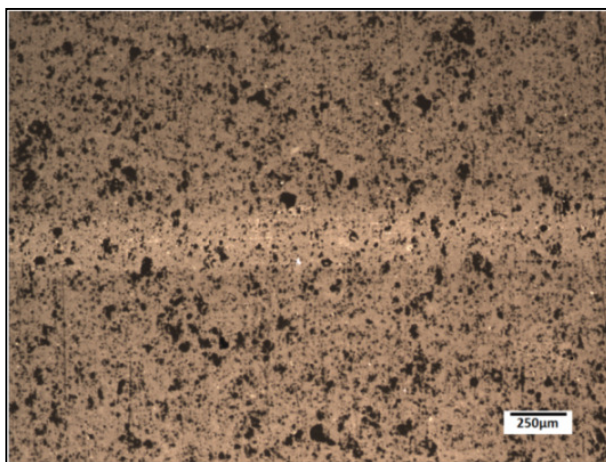


Figura 63: Imagem por microscopia eletrônica de varredura da superfície da amostra de porcelanato com riscamento simples. Partículas de quartzo visíveis na forma de pontos claros.

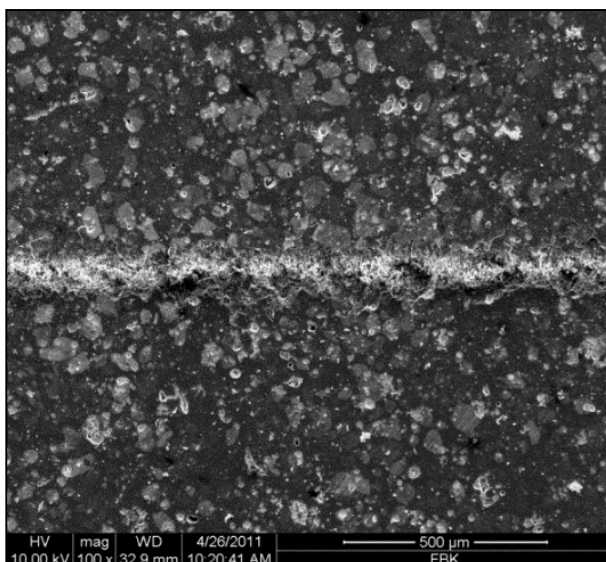
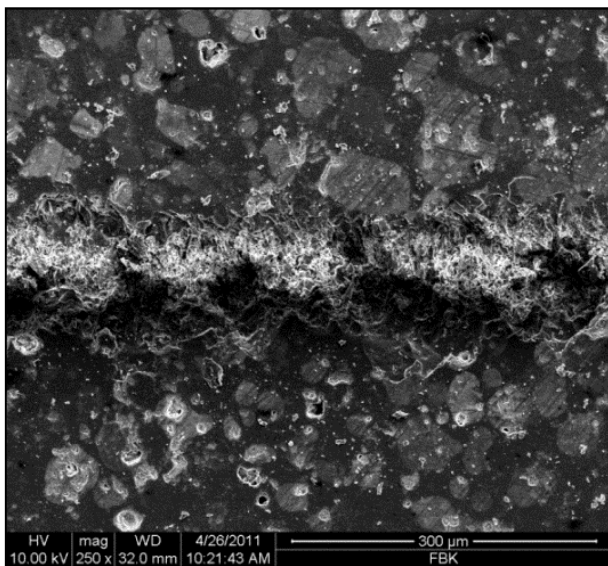


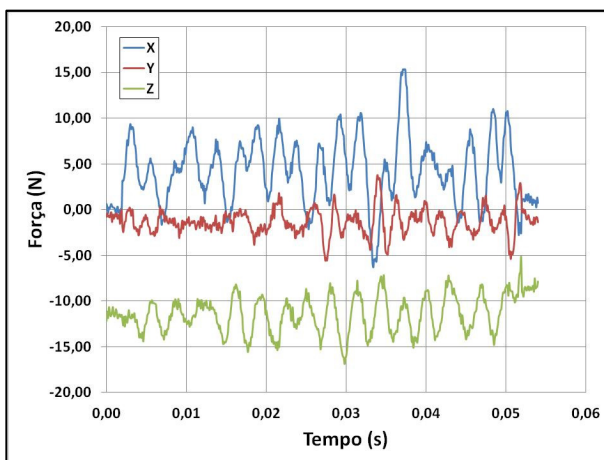
Figura 64: Imagem por microscopia eletrônica de varredura da superfície da amostra de porcelanato com riscamento simples. Partículas de quartzo visíveis na forma de pontos claros, com riscos remanescentes da usinagem industrial.



4.3.3.2 Riscamento cruzado

Os dados obtidos para os riscamentos cruzados se apresentaram de forma idêntica aos de riscamento simples. Valores de força média para os três eixos, e as formas do gráfico de forças se reproduziram, sendo impossível identificar, separar e avaliar o ponto exato de cruzamento. A Figura 65 apresenta detalhe do riscamento efetuado com 15° , explicitando a zona onde deveria se manifestar tal interação. Esta dificuldade advém principalmente do fato de que a interação gerada pelo cruzamento entre os riscos ocorrer em um espaço de tempo muito curto, da ordem de $2 \cdot 10^{-3}$ segundos.

Figura 65: Gráfico de força para o riscamento cruzado com 15° .

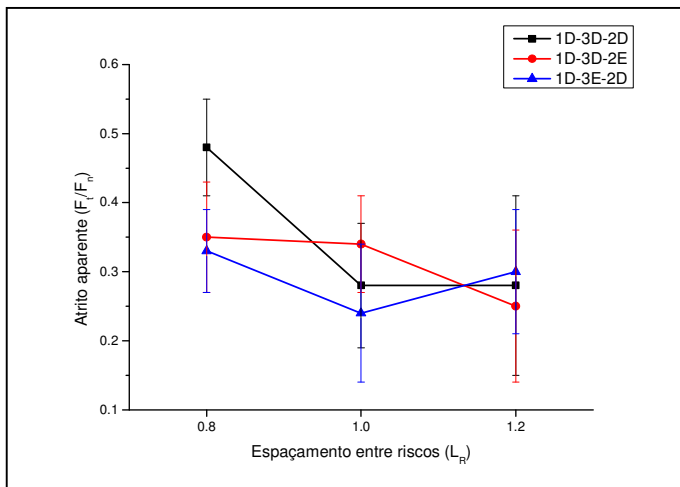


4.3.3.3 Riscamento paralelo

Para simplificar a comparação das forças no riscamento paralelo, foram usados os valores da relação de atrito aparente nas discussões, já que todos os riscos foram feitos com a mesma carga de 10 N aplicada por peso morto. Para todas as condições foram observadas pequenas desconexões entre os valores iniciais de ensaio, sendo estes atribuídos aos erros já discutidos no tópico anterior, 4.3.3.1 Riscamento simples.

Iniciando a discussão pela influência do espaçamento entre os riscos no atrito aparente do último risco realizado (R3), o gráfico apresentado na Figura 66 mostra uma tendência à redução do valor de atrito aparente com o aumento do espaçamento entre os riscos paralelos. Este tipo de comportamento se repetiu para todas as configurações de riscamento adotadas, sendo os maiores valores de atrito aparente para o espaçamento de $0,8L_R$. Especificamente nesta condição de ensaio, ocorre a sobreposição parcial entre os riscos e consequentemente a interação máxima entre estes. Com o aumento para $1,0L_R$, ocorreu a redução do atrito aparente devido à menor interação entre riscos, chegando ao mínimo em $1,2L_R$ onde a sobreposição é nula.

Figura 66: Gráfico de atrito aparente do risco R3 em função do espaçamento entre riscos.



A mudança de configuração de $0,8L_R$ para $1,0L_R$ foi a que apresentou a maior queda no valor de atrito aparente entre todas as configurações de espaçamento estudadas. Deste modo, é possível afirmar que tal intervalo ($0,8$ até $1,0L_R$) é o que transmite a maior parcela de força ao maquinário na forma de forças tangenciais e deve ser evitado. Esta conclusão fortalece a recomendação apresentada em tópicos anteriores, onde se deve evitar o espaçamento $0,8L_R$, pois este também não proporciona ganho de produtividade na remoção de material. Esta conclusão se aplica quando da concepção de ferramental abrasivo para rebolo de retificação plana, onde o espaçamento entre os grãos abrasivos, bem como as trajetórias impostas pelo maquinário a estes, devem gerar riscos paralelos com espaçamento entre $1,0L_R$ até $1,2L_R$.

4.3.4 Microscopia eletrônica de varredura

4.3.4.1 Riscamento simples

Analisando as imagens para o riscamento simples, foi possível confirmar a grande irregularidade da cavidade gerada, conforme microfotografia apresentada na Figura 67. Como nos testes em

retificadora plana, toda a extensão do risco apresentou grande quantidade de microfratura durante a remoção de material, característica típica para a usinagem por microlascamento. Com maiores ampliações de imagem, foi possível identificar, e de forma mais clara, a formação de defeitos adjacentes ao risco assinalados pelas setas brancas e apresentados na microfotografia da Figura 68. Tais trincas são provavelmente trincas radiais e laterais, com possível afloramento a superfície da amostra.

Figura 67: Imagem por microscopia eletrônica de varredura da superfície da amostra de porcelanato com riscamento simples.

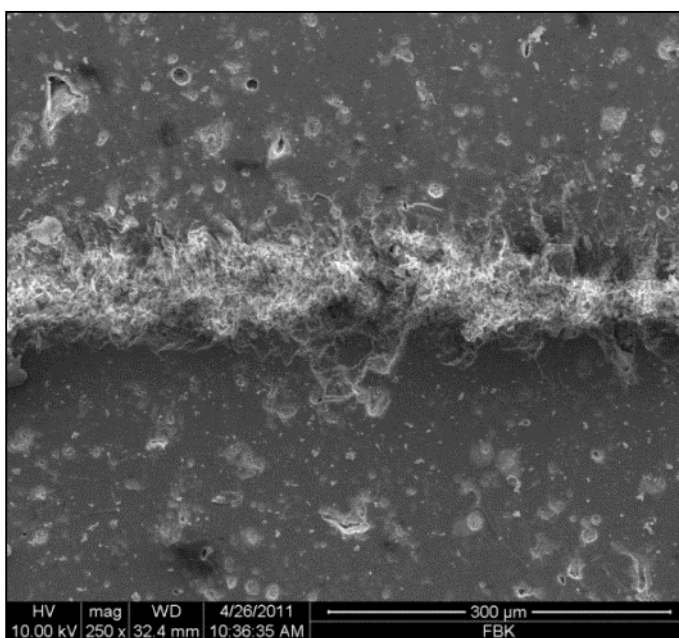
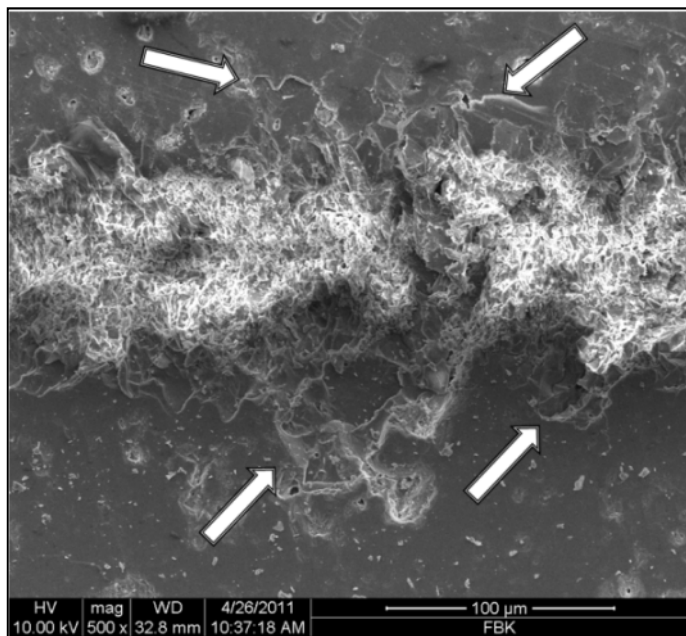


Figura 68: Imagem por microscopia eletrônica de varredura da superfície da amostra de porcelanato com riscamento simples. Setas brancas indicando formação de trincas laterais e radiais com afloramento à superfície.



4.3.4.2 Riscamento cruzado

Somadas as observações já mencionadas para o riscamento simples, o riscamento cruzado apresentou pequenas zonas com deformação plástica, conforme indicado pelas setas brancas nas microfotografias da Figura 69 e Figura 70. Estas zonas se formaram exatamente após o ponto de cruzamento dos riscos, apresentando grande quantidade de cavaco ainda preso à superfície da amostra. Possivelmente, empregando método de limpeza da amostra mais agressivo que jato de ar comprimido, estes cavacos seriam facilmente removidos.

Figura 69: Imagem por microscopia eletrônica de varredura da superfície da amostra de porcelanato com riscamento cruzado de 165° . Setas brancas indicando zonas com pequena deformação plástica.

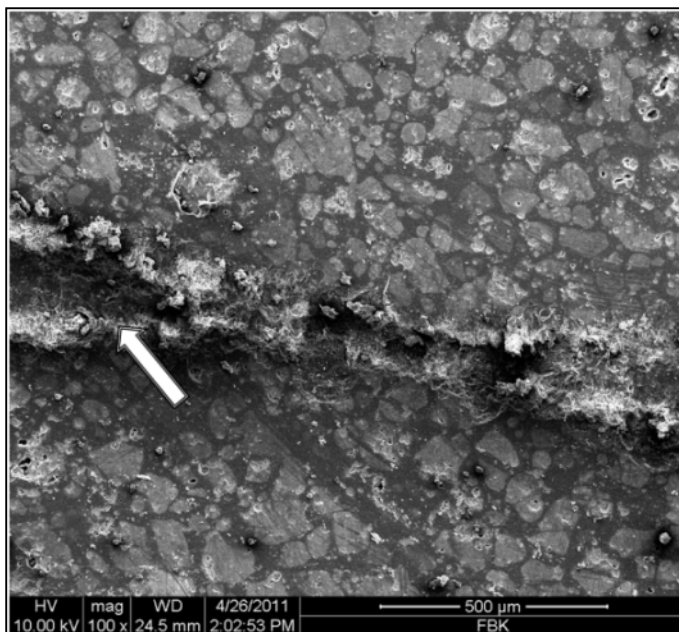
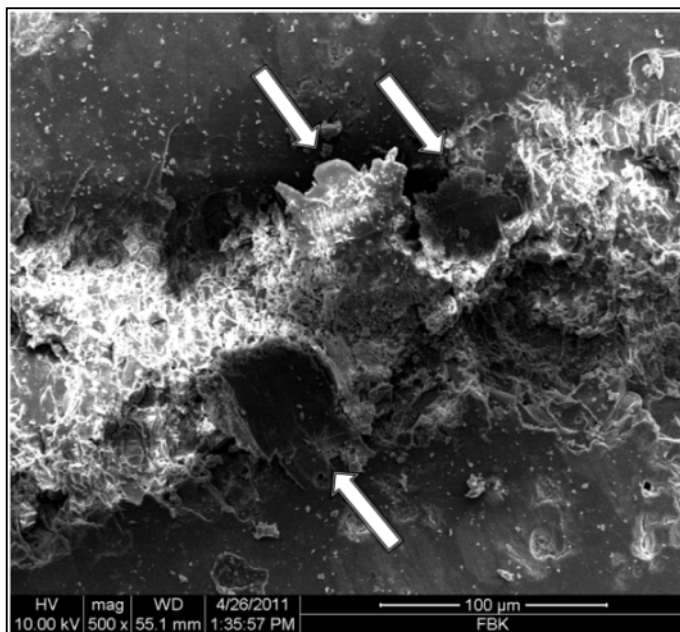


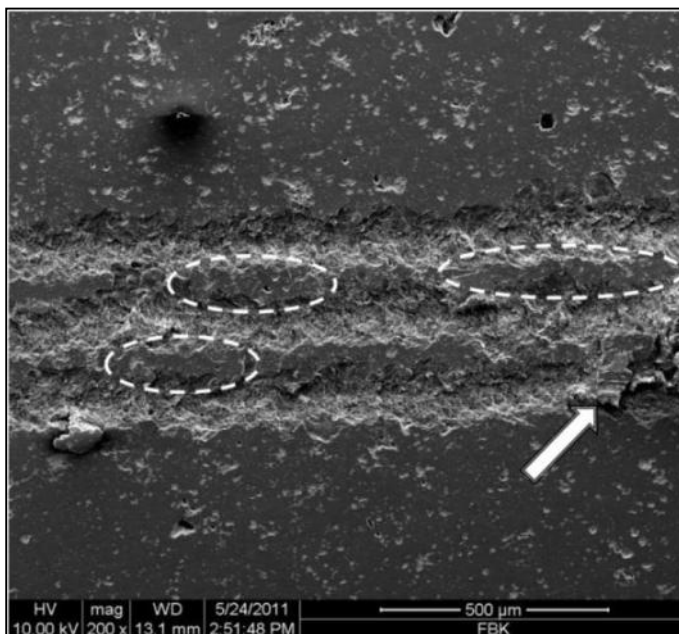
Figura 70: Imagem por microscopia eletrônica de varredura da superfície da amostra de porcelanato com riscamento cruzado de 45°. Setas brancas indicando zonas com pequena deformação plástica.



4.3.4.3 Riscamento paralelo

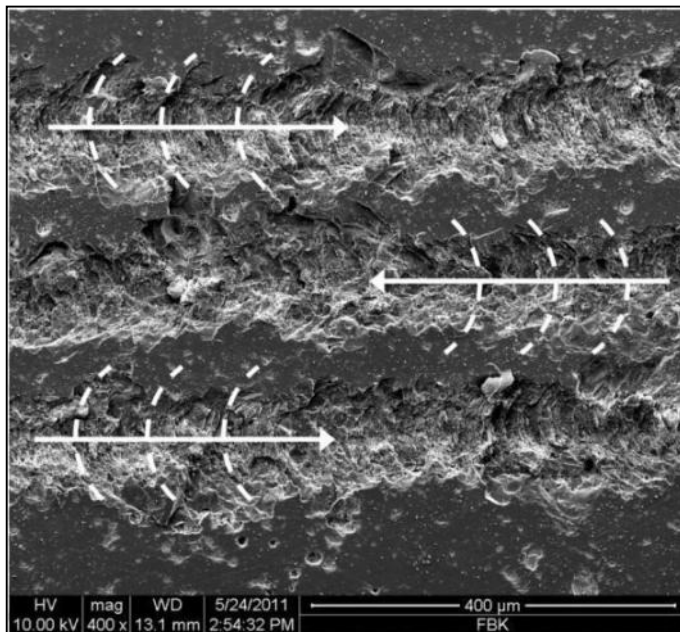
Para o riscamento paralelo, foi possível observar as mesmas características mencionadas para o riscamento simples e riscamento cruzado, sendo as zonas com presença de deformação plástica, extremamente raras e pequenas conforme apresentado na Figura 71. Foi visualizado também, e de forma mais clara que por microscopia óptica, o espaçamento entre os riscos e principalmente as ilhas de área não trabalhada entre estes, principalmente quando do espaçamento com $1,2L_R$.

Figura 71: Imagem por microscopia eletrônica de varredura da superfície da amostra de porcelanato com riscamento paralelo, configuração 1D-3E-2D, espaçamento entre riscos de $1,2L_R$. Seta branca indicando zona com deformação plástica. Elipses tracejadas indicando ilhas de área não trabalhada.



Especialmente para as amostras com espaçamento entre riscos de $1,2L_R$, foi possível identificar a formação de trincas cônicas semelhante ao observado em literatura para vidros a base de $\text{SiO}_2\cdot\text{CaO}$ (Lawn, et al., 1975). Assim sendo, é aceitável indicar o sentido de riscamento apenas pela interpretação da concavidade e ângulo de inclinação dos arcos formados na parte posterior da ferramenta de usinagem conforme apresentado na Figura 72.

Figura 72: Imagem por microscopia eletrônica de varredura da superfície da amostra de porcelanato com riscamento paralelo, configuração 1D-3E-2D, espaçamento entre riscos de $1,2L_R$. Arcos brancos mostrando a formação de trincas cônicas, com setas brancas indicando o sentido de usinagem.



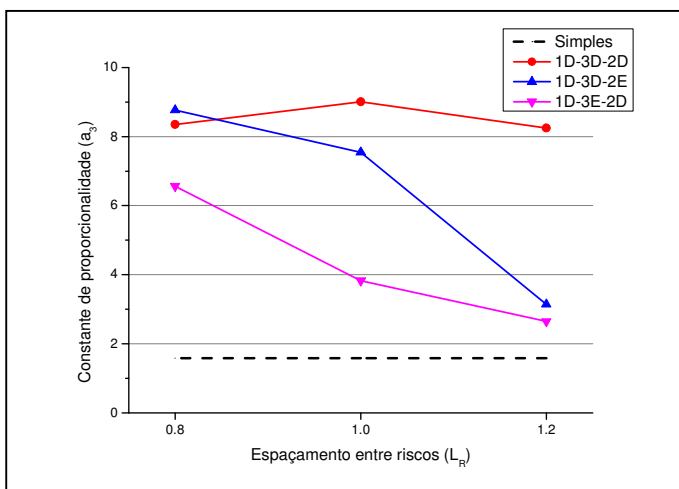
4.4 MODELAGEM MATEMÁTICA PARA REMOÇÃO DE MATERIAL

Considerando que os modelos avaliados são baseados em deduções semi-empíricas, e que estes são ajustados a partir de constantes de proporcionalidade experimentais, a discussão neste tópico será iniciada a partir da repetibilidade desta última. Vale mencionar que as constantes apresentadas foram manipuladas de forma que o resultado obtido gere resultados em micrometros, visto que todo o estudo realizado empregou tal unidade como grandeza de análise. Este procedimento tem como objetivo facilitar a comparação entre as grandezas medidas experimentalmente, e os resultados obtidos a partir das modelagens matemáticas. Esta manipulação afeta apenas a ordem de grandeza da constante, sem alterar os valores relativos entre si. Todas as

outras informações incluídas nas modelagens são propriedades básicas do material em estudo, e seus valores foram determinados em ensaios específicos.

Na modelagem proposta por Evans e Marshall, a constante a_3 é responsável pelo ajuste da altura curva. Para o riscamento simples esta foi calculada como sendo $a_3 = 1,6$, bem como para as nove configurações de riscamento paralelo estudadas, conforme apresentado na Figura 73.

Figura 73: Constante de proporcionalidade a_3 em função do espaçamento entre riscos para as diferentes configurações de riscamento paralelo.

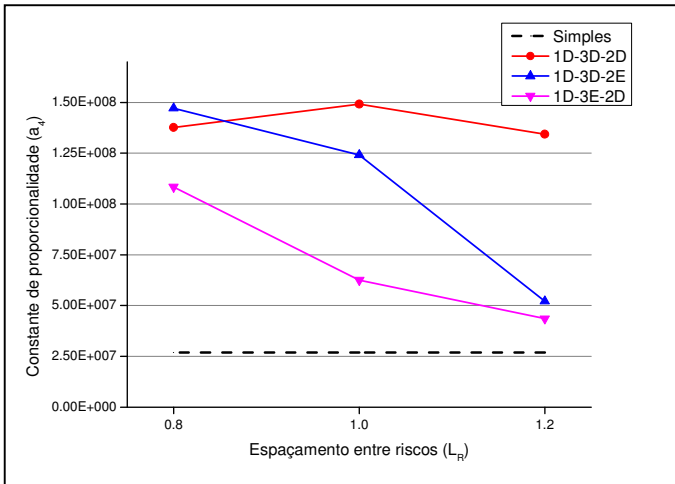


Inicialmente fica evidente a diferença entre o valor da constante de proporcionalidade a_3 para o riscamento simples em relação às diferentes configurações de riscamento paralelo. Certamente esta desconexão de resultados acarretaria grandes erros na previsão de remoção de material pelo conjunto de riscos efetuados. Considerando o espaçamento entre riscos de $0,8L_R$, a diferença apresentada foi da ordem de cinco vezes a mais que o valor calculado. E com o aumento do espaçamento, ocorre uma tendência para redução do valor de a_3 até níveis próximos ao previsto em riscamento simples. Isto, pois com maiores espaçamento, menor a interação entre riscos, e maior a semelhança com a condição de riscamento simples (isolado).

Exclusivamente para a configuração de riscamento 1D-3D-2D, o valor de a_3 se manteve estável em aproximadamente cinco vezes o valor do riscamento simples, comportamento este distoante aos apresentados pelas outras configurações de riscamento.

Para avaliação da modelagem matemática proposta por Hutchings, primeiramente foi calculada a constante de proporcionalidade $a_4 = 2,7 \cdot 10^7$, e trigonometricamente os valores de diâmetro equivalente da partícula abrasiva (d), e área aparente de contato (A), a partir dos valores de profundidade de riscamento e largura do risco, respectivamente. Com isto, foi estabelecido $d = 189,2 \mu\text{m}$ e $A = 5010 \mu\text{m}^2$. A partir deste ponto, as avaliações se focaram na constante de proporcionalidade a_4 , e sua representatividade para descrever as diferentes configurações de riscamento paralelo estudadas, conforme apresentado na Figura 74.

Figura 74: Constante de proporcionalidade a_4 em função do espaçamento entre riscos para as diferentes configurações de riscamento paralelo.



De forma geral, a modelagem proposta por Hutchings manteve as mesmas características apresentadas pela modelagem de Evans & Marshall. Como já discutido, novamente ocorreu uma grande diferença entre o valor calculado para o riscamento simples e as diferentes configurações de riscamento paralelo. Para o espaçamento entre riscos

de $0,8L_R$ a diferença ficou em média cinco vezes superior ao valor calculado. Mesmo para o espaçamento de $1,2L_R$ nas configurações 1D-3D-2E e 1D-3E-2D, a diferença ainda se manteve aproximadamente o dobro do esperado.

Avaliando de forma conjunta as modelagens matemáticas acima apresentadas, é visto que para ambas o valor da constante de proporcionalidade em função do espaçamento entre riscos, e configuração de sentido de riscamento, é superior ao previsto em riscamento simples. Este comportamento é explicado pela fragilização da superfície de trabalho devido à existência de defeitos gerados pelos riscamentos anteriores. Deste modo, mesmo que aplicado condições de ensaio idênticas, ocorrerá maior remoção de material em riscamentos subsequentes. Esta fragilização se reflete indiretamente reduzindo os valores de K_{Ic} e HV localmente na zona de interação entre riscos, e provocando, necessariamente, o aumento da constante de proporcionalidade para equilíbrio da equação. Portanto, se faz necessário um ajuste nas modelagens coletadas em literatura, onde seja considerada a fragilização da superfície de trabalho em função do histórico de processo. Para tal, é proposta uma adequação as modelagens de Evans & Marshall, e Hutchings, apresentadas na Equação 15 e Equação 16.

Modelo de Evans
& Marshall
adaptado

$$Q = a_3^n \frac{{}^8\sqrt{W^9}}{\sqrt{K_c} {}^8\sqrt{H^5}} {}^5\sqrt{\left(\frac{E}{H}\right)^4} \quad (15)$$

Modelo de
Hutchings
adaptado

$$Q = a_4^n \frac{{}^4\sqrt{W^5} {}^2\sqrt{d}}{{}^4\sqrt{A} {}^4\sqrt{K_c} {}^3\sqrt{H}} \quad (16)$$

Onde:

- Q = volume de massa perdida por unidade linear;
- a_3 e a_4 = constantes experimentais dependente do tipo de material;
- n = constante experimental dependente do histórico de processo;
- W = carga aplicada;
- d = dimensão da partícula abrasiva;
- A = área aparente de contato;
- K_c = tenacidade a fratura do material;
- H = dureza Vickers do material;

O expoente n apresentado neste trabalho é uma função dependente da interação entre riscos, ou seja, das variáveis espaçamento entre riscos e sentido de riscamento para riscos paralelos. Para o modelamento proposto por Evans & Marshal, a magnitude de n dentro das condições analisadas, variou entre 4,8 para a interação máxima de riscos a $0,8L_R$, até valores próximo a 2 quando do espaçamento de $1,2L_R$. Já para o modelamento proposto por Hutchings, a magnitude de n se manteve entre 1,1 até 1,0, o que demonstra uma dependência muito menor do modelo a constante de proporcionalidade. Não obstante, uma gama muito maior de outras variáveis podem desempenhar papel fundamental na fragilização do material, e que carecem de estudos mais aprofundados, como: alteração da rugosidade, exposição de porosidade, crescimento sub-crítico de trinca, entre outras.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram apresentados os resultados experimentais e teóricos para diferentes configurações de riscamento frágil em placa de revestimento cerâmico do tipo porcelanato. Foram desenvolvidos experimentos que analisaram a influência dos parâmetros de processo na usinabilidade do porcelanato, sendo eles: tamanho de grão abrasivo, velocidade de corte, ângulo de cruzamento entre riscos, espaçamento e configuração do sentido entre riscos paralelos sequenciais. Estes tiveram seus comportamentos comparados e discutidos com o objetivo de sugerir a forma otimizada no quesito remoção de material. Por fim as modelagens matemáticas para remoção de material coletadas em literatura foram avaliadas, e adaptações a estas foram propostas a fim de considerar a interação entre riscos paralelos.

As principais realizações, contribuições e resultados deste trabalho são apresentados a seguir:

5.1 ENSAIO DE RISCAMENTO EM RETIFICADORA PLANA.

- Os resultados de largura e profundidade de risco sofrem pouca influência dos parâmetros de processo, confirmando a literatura que indicava que estas dependem principalmente do tamanho do grão abrasivo;
- Não foram identificadas ilhas de área não trabalhada, ou seja, esta é uma característica exclusiva quando da interação entre riscos;
- Quando do ensaio com grão abrasivo de $100\text{ }\mu\text{m}$ a 20 m/s , foram identificadas parcelas de usinagem dúctil no início e fim dos riscos. Estas apontam que é possível obter comportamento dúctil durante a usinagem de materiais frágeis, desde que a profundidade de corte seja reduzida a valores da ordem de $0,5\text{ }\mu\text{m}$ ou menos;

5.2 ESCLERÔMETRO CNC

5.2.1 Ensaio de riscamento simples

- Comparando o valor calculado para a área superficial afetada com o medido por análise digital de imagens, foi constatado que esta supera em $29,2\%$ a zona de contato. Assim sendo, é possível afirmar que mecanismos de propagação de danos, principalmente trincas laterais, atuam durante a usinagem frágil de placas cerâmicas do tipo porcelanato e geram o referido aumento;

- Foi determinado que a remoção de material por usinagem frágil ocorre de forma comparável ao fenômeno de *stick-slip*, com carregamento – fratura – deslocamento livre – impacto e reinício do ciclo;

5.2.2 Ensaio de riscamento cruzado

- Avaliando os riscamentos por microscopia óptica, e posterior análise digital de imagens, a maioria dos ângulos interferem na remoção superficial;
- O ângulo de cruzamento com 135° apresentou o maior ganho de produtividade. Os ângulos de 75° e 105° foram os que apresentaram a menor influência, ou até influência negativa;

5.2.3 Ensaio de riscamento paralelo

- Dentre as três configurações de espaçamento entre riscos avaliadas, a condição $1,2L_R$ foi a que apresentou maior produtividade no quesito remoção de material, visto que, nesta, devido a fragilização da superfície por riscos anteriores, a área entre riscos que não seria afetada pela ferramenta também é removida por mecanismos de propagação de trincas;
- Para maximização da remoção de material no regime frágil em placa cerâmicas do tipo porcelanato, a configuração otimizada deve ser: $1,2L_R$ de espaçamento entre riscos, com todos os riscos sendo efetuados no mesmo sentido (1D-3D-2D);

5.3 MODELAGEM MATEMÁTICA

- Tanto a modelagem proposta por Evans & Marshall, quanto por Hutchings, apresentaram grande diferença entre o valor da constante de proporcionalidade calculada para o riscamento simples e as diferentes configurações de riscamento paralelo. Esta diferença advém principalmente do efeito fragilizante gerado por riscos prévios na superfície do material, que aumentam a taxa de remoção de material por risco executado;
- Adaptações às modelagens matemáticas foram propostas com a finalidade de ajustar a constante de proporcionalidade em função do histórico de processo apresentado pela superfície para a usinagem frágil de placas cerâmicas do tipo porcelanato;

5.4 APLICAÇÃO TÉCNICA

Somando todas as conclusões das análises realizadas, e avaliando de forma integrada, é sugerido para a maximização da remoção de material durante a usinagem frágil de placas cerâmicas do tipo porcelanato;

Que a concepção cinemática deva considerar:

- Que se realize riscamentos no mesmo sentido, conforme a configuração 1D-3D-2D apresentada;
- Quando da necessidade de cruzamento entre riscos, as trajetórias devem favorecer cruzamentos entre riscos de 45° , 90° e principalmente 135° . Em contrapartida, devem ser evitados os ângulos de 75° e 105° ;
- O livre caminho médio entre os riscos no riscamento paralelo deve estar entre 1,0 e $1,2L_R$, de forma a minimizar a presença de ilhas de área não trabalhada, e permitir que os riscamentos subsequentes às removam;

Que a ferramenta abrasiva deva considerar:

- O aumento do tamanho do grão abrasivo se reflete diretamente aumentando a quantidade de material removido por risco;
- O livre caminho médio entre grãos deve estar entre 1,0 e $1,2L_R$, de forma a minimizar a presença de ilhas de área não trabalhada, e permitir que os riscamentos subsequentes às removam;
- Livre caminho médio entre os grãos abrasivos não deve ser inferior a $1,0L_R$, visto que abaixo desta condição não se obtém ganho de produtividade, e ocorre grande transferência de carga ao maquinário;

5.5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar matematicamente o campo de tensões gerado durante as diversas configurações de riscamento estudadas;
- Desenvolvimento de ferramenta com geometria circular para riscamento frágil, assim excluindo a influência geométrica gerada pelas faces do indentador Vickers no ensaio de riscamento cruzado;
- Expandir a abrangência das variáveis analisadas durante o riscamento por retificação plana de mergulho;

- Estudar placas cerâmicas de porcelanato com diferentes rugosidades, de modo a avaliar a influência desta na usinabilidade;
- Aprimorar as modelagens matemáticas para remoção de material por usinagem frágil, de modo que estas considerem de forma efetiva o histórico de processo e fragilização da superfície;
- Avaliar em maquinário industrial as conclusões apresentadas para otimização da produtividade durante a retificação frágil de porcelanatos;

REFERÊNCIAS

- ABCERAM. 2009. Associação Brasileira de Cerâmica. *ABCERAM*. [Online] 12 de novembro de 2009. [Citado em: 12 de novembro de 2009.] www.abceram.org.br.
- ABNT NBR 15463. 2007. *Placas Cerâmicas para Revestimento – Porcelanato*. 2007.
- Agarwal, S, Rao e V., P. 2008. Experimental investigation of surface/subsurface damage formation and material removal mechanisms in SiC grinding. *International journal of machine tools & manufacture*. 2008, 48.
- Ahn, Y., Cho, N., Lee, S., Lee, D. 2003. Lateral crack in abrasive wear of brittle materials. *JSME International Journal*. 2003, Vol. 46.
- Alves, H. J. , Melchiades, F. G., Freitas, M. R., Boschi A. O. 2010. Polimento em peças de porcelanato: Avaliação da porosidade final e da resistência ao manchamento. *Cerâmica industrial*. 2010, Vol. 15.
- Alves, H. J., Minussi, F. B., Melchiades, F. G., Boschi, A. O. 2009. Porosidade susceptível ao manchamento em porcelanato polido. *Cerâmica industrial*. 14, 2009.
- ANFACER. 2009. Associação Nacional de Fabricantes de Cerâmica para Revestimento. *Associação Nacional de Fabricantes de Cerâmica para Revestimento*. [Online] 12 de novembro de 2009. [Citado em: 12 de novembro de 2009.] www.anfacer.org.br.
- Arantes, F. J. S., et al. 2001. O manchamento e a porosidade fechada de grês porcelanato. 2001, 6.
- Ashy, M.F. e Jones, D. R. H. 1982. *Engineering materiais I*. 1982.
- Atech. 2009. *Atech*. [Online] 2009. [Citado em: 16 de Novembro de 2009.] <http://www.atechsrl.it>.
- Barsoum, M. 1997. *Fundamentals of ceramics*. s.l. : McGraw-Hill, 1997.
- Bittencourt, E. L. e Benicá, E. 2002. Aspectos superficiais do produto grês polido. *Cerâmica industrial*. 2002, 7.
- Cabral Jr., M., et al. 2010. Panorama e perspectivas da indústria de revestimentos cerâmicos no Brasil. *Cerâmica industrial*. 15, 2010, Vol. III.
- Callister, W. D. 1999. *Materials science and engineering: an introduction*. s.l. : Willey, 1999.
- Características técnicas e polimento de porcellanatos*. Rosso, J., Cunha, E. S. e Rojas-Ramírez, R. A. 2005. 10, São Paulo : Cerâmica Industrial, 2005.
- Cavalcante, P. M. T., et al. 2003. Fatores chaves na resistência a abrasão de pisos de grês porcelanato. *Cerâmica industrial*. 2003, 8.

- Cavalcante, P. M. T., et al. 2004. Influência das características superficiais na resistência a manchas do grés porcelanato. *Cerâmica industrial*. 2004, 9.
- CCB. 2009. *Centro Cerâmico do Brasil*. [Online] 2009. www.ccb.org.br.
- Chen, X e Rowe, W. B. 1996. Analysis and simulation of the grinding process. Part II: Mechanics of grinding. *International journal of machine tools and manufacture*. 1996, Vol. 36, 8.
- Chiamulera, C., Fernandes, F. G., Evangelista, L. L., Weingaertner, W. L., Fredel, M. C. 2011. Caracterização de partículas de SiC para fabricação de pedras abrasivas para o polimento de placas de porcelanato. *55º Congresso Brasileiro de Cerâmica*. 2011.
- Chiang, Y. M., Birnie III, D. e Kingery, W. D. 1997. *Physical Ceramics: Principles for Ceramic Science and Engineering*. s.l. : Wiley, 1997.
- Davidge, R. W. 1979. *Mechanical behavior of ceramics*. 1979.
- . 1979. *Mechanical behaviour of ceramics*. s.l. : Cambridge Press, 1979.
- De Mello, J. D. B. 1994. *Introdução ao estudo do desgaste*. Florianópolis : s.n., 1994.
- De Noni Jr, Agenor. 2007. *Estudo das Propriedades Mecânicas de Porcelanato através da Avaliação de Tensões Residuais Microscópicas e Macroscópicas Originadas Durante a Etapa de Resfriamento do Ciclo de Queima*. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis : s.n., 2007. Tese.
- Dondi, M., et al. 2005. The role of surface microstructure on the resistance to stains of porcelain stoneware tiles. *Journal of the european ceramic society*. 2005, 25.
- Esposito, L., Tucci, A. e Naldi, D. 2004. The reliability of polished porcelain stoneware tiles. *Journal of the European Ceramic Society*. 2004.
- Evans, A. G. 1979. Abrasive wear in ceramics. An assessment. [ed.] US Gov. Printing Office. *The Science of Ceramic Machining and Surface Finishing II*. 1979.
- Evans, A. G., Marshall, D. D. 1981. *Fundamental of friction and wear of Materials - Wear mechanisms in ceramics*. Ohio : American Society for Metals, 1981.
- Eyre, T. S. 1976. *Tribology International*. 1976.
- Fujita, H, et al. 2006. Contribuicao ao estudo da retificacao abrasiva de materiais ceramicos. *Ceramica*. 52, 2006.
- Gellert, B. 2010. *Implementação do terceiro eixo na máquina de riscamento esclerômetro*. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis : s.n., 2010. Trabalho de Conclusão de Curso.

- Green, J. D. 1998. *An introduction to the mechanical properties of ceramics*. 1998.
- Guiberteau, F., Padture, N. P. e Cai, H. 1993. A simple cyclic Hertzian test for measuring damage accumulation in polycrystalline ceramics. *Philosophical magazine*. 1993, Vol. 68.
- Hagan, J. T. e Swain, M. V. 1978. The origin of median and lateral cracks around plastic indents in brittle materials. *Journal of Physics: Applied Physics*. 1978, Vol. 11.
- Heck, C. 1996. Gres Porcelanato. *Associação Brasileira de Cerâmica*. 1996.
- Heck, Clarice. 1996. Gres porcelanato. *Cerâmica industrial*. 1996.
- Hegadekatte, V., Huber, N. e Kraft, O. 2005. Finite element based simulation of dry sliding wear. *Modelling and simulation in materials science and engineering*. 2005, 13.
- Huang, H. e Liu, Y. C. 2003. Experimental investigations of machining characteristics and removal mechanisms of advanced ceramics in high speed deep grinding. *International journal of machine tools & manufacture*. 2003, 43.
- Hutchings, I. M. 1992. *Tribology: friction and wear of engineering materials*. London : Metallurgy & Materials Science Series, 1992.
- Hutchings, I. M., et al. 2005. Analysis and laboratory simulation of an industrial polishing process for porcelain ceramic tiles. *Journal of the european ceramic society*. 2005, 25.
- Hutchings, I. M., et al. 2005. Development of surface finish during the polishing of porcelain ceramic tiles. *Journal of materials science*. 2005, 40.
- . 2006. Optimización del processo de pulido para piezas de gres porcelánico. *Qualicer*. 2006.
- . 2006. Porcelain tile microstructure: implications for polishability. *Journal of the european Ceramic Society*. 2006, Vol. 26.
- Hutchings, I. M., et al. 2006. Porcelain tile microstructure: implications for polishability. *Journal of the european ceramic society*. 2006, 26.
- Hwang, T. W. e Malkin, S. 1999. Upper bound analysis for specific energy in grinding of ceramics. *Wear*. 1999, 231.
- Kigle-Boeckler, G. 1995. Measurement of gloss and reflection properties of Surfaces. *Metal Finishing*. 1995.
- Kim, H. e Kim, T. 2001. Measurement of hardness on traditional ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*. 2001, 22.
- Klocke. 1997. Modern approaches for the production of ceramic components. *Journal of the european ceramic society*. 1997, 17.

- Klocke, F., König, W. 2005. *Fertigungsverfahren 2: Scheleifen, Honnen, Läppen*. Aachen : s.n., 2005.
- König, W. 1980. *Retificação, brunimento e lapidação*. [trad.] Walter Weingaertner. Florianópolis : s.n., 1980.
- Lawn, B. R., Evans, A. G., Marshall, D. B. 1980. Elastic/Plastic indentation damage in ceramics: The Median/Radial crack system. *Journal of the American Ceramic Society*. 1980, Vol. 63.
- Lawn, B. R., Hockey, B. J. e Richter, H. 1983. Indentation analysis: applications in the strength and wear of brittle materials. *Journal of Microscopy*. 1983, Vol. 130.
- Lawn, B. R., Swain, M. V. 1975. Microfracture beneath point indentations in brittle solids. *Journal of materials science*. 10, 1975.
- Lee, K. W., Wong, P. K. e Zhang, J. H. 2000. Study on the grinding of advanced ceramics with slotted diamond wheels. *Journal of materials processing technology*. 2000, 100.
- Li, K, et al. 1997. Wear of diamond wheels in creep-feed grinding of ceramic materials II. Effects on process responses and strength. *Wear*. 1997, 221.
- Li, K. T. e Liao, W. 1997. Modelling of ceramic grinding processes. Part I: Number of cutting points and grinding forces per. grit. *Journal of materials processing technology*. 1997, 65.
- Li, W., et al. 2007. Wear of diamond grinding wheels and material removal rate of silicon nitrides under different machining conditions. *Materials Letters*. 2007, 61.
- Lopes, J. R. 2007. *Análise do comportamento do fluxo de fluido lubri-refrigerante em tuberias do tipo sapata para a retificação em alta velocidade*. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis : s.n., 2007. Tese.
- Malkin, S. e Hwang, T. W. 1996. Grinding mechanisms for ceramics. 1996.
- . 1996. Grinding mechanisms for ceramics. 1996.
- Marinescu, I. D, Tonshoff, H. K. e Inasaki, I. 2000. *Handbook of ceramic grinding and polishing: properties, processes, technology, tools and typology*. New York : s.n., 2000.
- Mayer, J. E. e Fang, G. P. 1995. Effect of grinding parameters on surface finish of ground ceramics. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 1995, Vol. 44.
- McColm, I. J. 1990. *Ceramic Hardness*. s.l. : Plenum Press, 1990.
- Menegazzo, A. P. M., et al. 2002. Avaliação da resistência mecânica e módulo de Weibull de produtos tipo grês porcelanato e granito. *Cerâmica Industrial*. 2002, 7.

- Menegazzo, A. P. M., Lemos, F. L. N., et al. 2000. Grés porcelanato. Parte I: Uma abordagem mercadológica. 2000, 5.
- Menegazzo, A.P.M., et al. 2002. Avaliação da Resistência Mecânica e Módulo de Weibull de Produtos Tipo Grês Porcelanato e Granito. 2002, Vol. 7, 1.
- Moura, C. B., et al. 2006. Análise da influência das variáveis cor e brilho na limpabilidade de porcelanatos. *Cerâmica industrial*. 2006, Vol. 11.
- Munz, D. e Fett, T. 1999. *Ceramics - Mechanical properties, failure behaviour, material selection*. 1ª edição. s.l. : Springer, 1999.
- Nascimento, A. S. B. S., et al. 2011. Adaptação de um esclerometro retiníneo automatizado para simulação de cinemática do processo de brunimento em placas de porcelanato. *6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*. 2011.
- NBR 13818. 1997. *Placas cerâmicas para revestimento: especificações e métodos*. 1997.
- On material removal mechanisms in finishing of advanced ceramics and glasses*. Komanduri, R. 1996. Vienna : Elsevier, 1996.
- Orts, M. J., et al. 2001. Grinding work simulation in industrial porcelain tile polishing. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. 40, 2001.
- Parra B. S., Gennari, R. C., Melchiades, F. G., Boschi, A. O. 2006. Rugosidade superficial de revestimentos cerâmicos. *Cerâmica Industrial*. 2006, Vol. 11, pp. 15-18.
- Pinho, G. D. 2011. *Estudo sobre a interação de trincas entre duas indentações Vickers sucessivas*. Florianópolis : Universidade Federal de Santa Catarina, 2011. Trabalho de conclusão de curso.
- Raimondo, M., et al. 2006. Propriedades superficiais de peças de grês porcelanato: influência de diferentes recobrimentos protetores. *Cerâmica Industrial*. 2006.
- Rambaldi, E., et al. 2007. Recycling of polishing porcelain stoneware residues in ceramic tiles. *Journal of the european ceramic society*. 2007, 27.
- Richerson, D. W. 1992. *Modern Ceramic Engineering*. New York : Dekker, 1992.
- Rinne, M. 2008. *Fracture mechanics and subcritical crack growth approach to model time-dependent failure in brittle rock*. Espoo, Finland : Helsinki University of Technology, 2008.
- Rosso, J., Cunha, E. S. e Rojas-Ramírez, R. A. 2005. Características técnicas e polimento de porcelanatos. 2005, 10.
- Sánchez, E., et al. 2002. Polishing porcelain tile - Part 1: Wear mechanism. *American ceramic bulletin*. 2002, Vol. 81, 9.

- Sánchez, E., et al. 2005. Porcelain tile microstructure: Implications for polished tile properties. *Journal of the European Ceramic Society*. 2005.
- Sánchez, J. 2001. Comportamiento del gres porcelánico durante la operación de pulido. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. 6, 2001, Vol. 40.
- Sena, L. 2007. *Avaliação do sistema de posicionamento do carro porta-rebolo numa retificadora CNC Flexa 600-L com o auxílio de sinais de emissão acústica*. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis : s.n., 2007. Dissertação.
- Shen, J. Y., et al. 2002. Thermal aspects in the face grinding of ceramics. *Journal of materials processing technology*. 2002, 129.
- Sidjanin, L., et al. 2006. Measurement of Vickers hardness on ceramic floor tiles. *Journal of the European Ceramic Society*. 2006, 27.
- Sousa, F. J. P. 2007. *Análise de aspectos cinemáticos do processo industrial de polimento de porcelanatos*. Florianópolis : s.n., 2007. Tese.
- Sousa, F. J. P., et al. 2006. Evaluation of measurement uncertainties for a scratching tester. *Measurement*. 2006, Vol. 39, 7.
- Sousa, F. J. P., et al. 2008. Optimization of the kinematics available in the polishing process of ceramic tiles by computational simulations. *The American Ceramic Society*. 1, 2008, Vol. 92.
- Souza, C. F. 2007. *Resistência à fratura de subestruturas para próteses parciais fixas posteriores de zircônia densa sob testes de fadiga cíclica*. Rio de Janeiro : Tese, 2007.
- Souza, S. A. 1982. *Ensaio mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos*. 5a. São Paulo : Edgard Blücher, 1982.
- Swain, M. V. e Hagan, J. T. 1976. Indentation plasticity and the ensuing fracture of glass . *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1976.
- Tyrolit. 2009. [Online] 2009. [Citado em: 16 de Novembro de 2009.] www.tyrolit.com.
- . 2009. [Online] 2009. [Citado em: 16 de Novembro de 2009.] www.tyrolit.com.
- . [Online] [Citado em: 16 de Novembro de 2009.] www.tyrolit.com.
- Wang, C. Y., et al. 2003. How abrasive machining affects surface characteristics of vitreous ceramic tile. *Ceramic bulletin*. 2003.
- Wiggers, W. S., Santos, R. A. e Hotza, D. 2007. Evolução da superfície do porcelanato ao longo do processo de polimento. *Cerâmica industrial*. 2007, 12.
- Yin, L., et al. 2005. High speed versus convetional grinding in high removal rate machining of alumina and alumina-titania. *International journal of machine tools & manufacture*. 2005, 45.

Zanotto, E. D. e Migliore Jr., A. R. 1991. *Propriedades mecânicas de materiais cerâmicos: Um introdução*. São Carlos : Universidade Federal de São Carlos, 1991.

Zhang, B., et al. 2003. Grinding induced damage in ceramics. *Journal of materials processing technology*. 2003, 132.

APÊNDICE A – Grupo de trabalho

Este de trabalho de doutorado é parte integrante do Programa de Cooperação Internacional Brasil-Alemanha para Pesquisa Colaborativa na Área de Tecnologias de Manufatura (*Brazilian-German Collaborative Research Initiative on Manufacturing Technology - BRAGECRIM*). O projeto foi submetido e aprovado com o título “Análise e simulação do processo de polimento para revestimentos cerâmicos de porcelanato” (*Analysis and simulation of the polishing process of porcelain stoneware tiles*). Os recursos aprovados ultrapassam o valor de R\$ 300.000,00, contabilizando apenas a parte brasileira do projeto. Dentro deste montante, os recursos são destinados à compra de equipamentos, análises laboratoriais, participação em congressos e eventos pertinentes ao tema, bolsas de estudo no Brasil e intercâmbio, e passagens internacionais.

O programa BRAGECRIM é uma cooperação internacional entre a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), a *Deutsche Forschungsgemeinschaft* (DFG), o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), e a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP).

O Núcleo de Estudo em Materiais Cerâmicos e Vítreos (CERMAT), situado na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), concebe a parte brasileira filiada ao projeto. Como filiação alemã, apresenta-se o laboratório *Fertigungstechnik und Betriebsorganisation* (FBK), situado na *Technische Universität Kaiserslautern* (TU-KL). A TU-KL é localizada na cidade de Kaiserslautern, estado de Rheinland-Pfalz, Alemanha.

A coordenadoria brasileira do projeto fica a cargo do prof. Dr. Eng. Orestes Estevam Alarcon, compartilhando a orientação da equipe com o prof. Dr. Eng. Márcio Celso Fredel. A coordenadoria e orientação alemã compete ao prof. Assistente Dr. Eng. Fabio José Pinheiro Sousa.

APÊNDICE B – Programa de simulação Polibem

O programa de simulação Polibem foi desenvolvido por Sousa em 2007, sendo fruto da parceria entre a Universidade Federal de Santa Catarina, e as empresas Portobello e Ceusa (Sousa, 2007). O objetivo principal do programa é simular de forma analítica o processo de usinagem em revestimento cerâmico do tipo porcelanato alto brilho. Porém, devido à complexidade fenomenológica dos processos envolvidos e tempo hábil para conclusão do trabalho, foi incluída inicialmente apenas a cinemática da etapa de brunimento no programa.

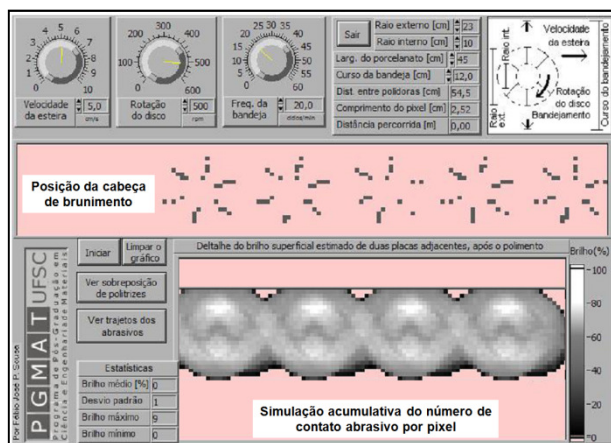
Com o uso do programa é possível estimar a distribuição do brilho sobre a placa cerâmica para diferentes parâmetros cinemáticos de processo. Como proveito principal do programa, tem-se a inexistência do desperdício de matéria-prima durante o teste de novos parâmetros cinemáticos ou a parada de linha para tal.

O programa utiliza como parâmetros de entrada de processo as seguintes variáveis:

- Velocidade de esteira (cm/s);
- Rotação do disco abrasivo (rpm);
- Frequência de bandejamento (ciclos por minuto);
- Raio interno e externo do cabeçote de brunimento (cm);
- Largura da placa transversal ao avanço (cm);
- Curso de bandejamento (cm).

Na Figura 75 é apresentada a tela principal do programa Polibem, onde é possível visualizar o painel de entrada das variáveis, uma breve descrição da cinemática do cabeçote de brunimento e a visualização em tempo real da simulação.

Figura 75: Tela principal do programa Polibem.

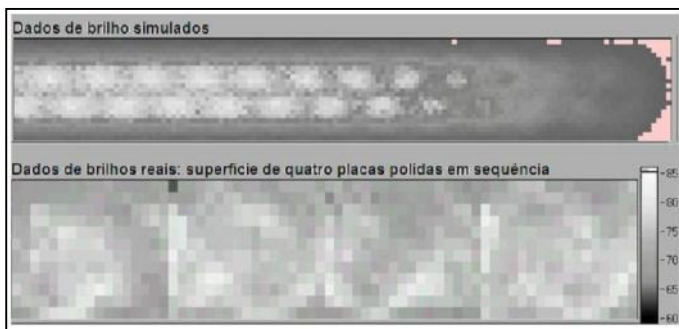


Fonte: Adaptado de (Sousa, 2007).

O programa correlaciona resultados de brilho relativos ao número de contatos abrasivos para cada pixel. Sendo assim, a zona que sofrer o maior número de contato será, conseqüentemente, aquela com maior brilho. Ao visualizar a simulação em tempo real apresentada na Figura 75, pode-se avaliar através do histograma de cores que as áreas mais claras foram as que obtiveram maior contagem de contatos abrasivos; as áreas mais escuras, menor contagem de contato; áreas rosadas, onde ainda não ocorreu contato.

Na Figura 76 é apresentado um comparativo para distribuição de brilho simulada e medida em placas reais. O resultado obtido com o programa foi satisfatório, pois apresentou semelhanças ao processo real. O padrão de zigue-zague no brilho, proveniente da oscilação lateral dos cabeçotes de brunimento, pode ser visto em ambas as análises. O padrão de zigue-zague é conhecido como “sombra de polimento”, resultado de uma interação muitas vezes não desejada. A sombra de polimento é decorrente da interação entre a frequência de oscilação lateral do cabeçote de brunimento e a velocidade de avanço da esteira transportadora das placas cerâmicas (Sousa, 2007).

Figura 76: Comparação entre medidas de brilho reais e dados simulados, incluindo o efeito de bandejamento.

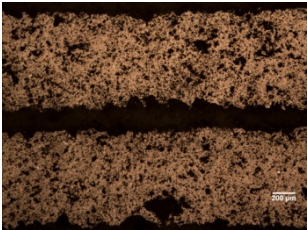
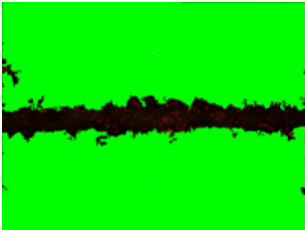
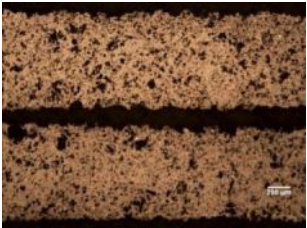
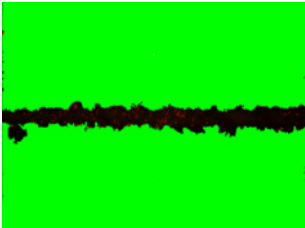
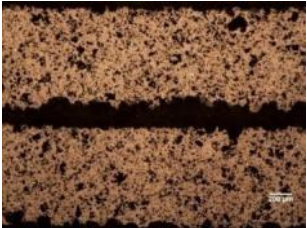
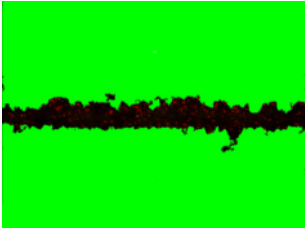


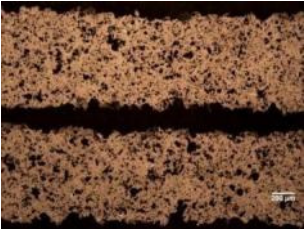
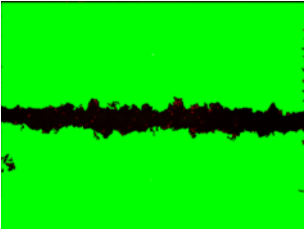
Fonte: Adaptado de (Sousa, 2007).

Apesar das semelhanças entre os resultados reais e simulados apresentadas pelo autor, o programa Polibem ainda necessita de ajustes e inclusão de parâmetros de processos. Atualmente o programa não fornece valores precisos de brilho, extrapolando os resultados, baseando-se no somatório de contatos abrasivos por área e em dados experimentais obtidos em literatura. Por isso a interação física entre a peça de trabalho e o material abrasivo empregado (sistema tribológico) é contabilizada de forma indireta. Tendo ciência de tais limitações do programa de simulação, e principalmente da capacidade de aumento da acuidade deste, uma série de estudos complementares estão sendo realizados, tanto no que concerne à simulação numérica de trajetória quanto à fenomenologia do desgaste. A inclusão da etapa de retificação é o próximo objetivo a ser atingido pelos desenvolvedores do programa. Todos estes esforços visam uma melhor acuidade da simulação, como forma de gerar aumento da produtividade do processo através do emprego de conhecimento científico.

APÊNDICE C – Imagens por microscopia óptica e identificação digital pra riscamento empregando retificadora plana

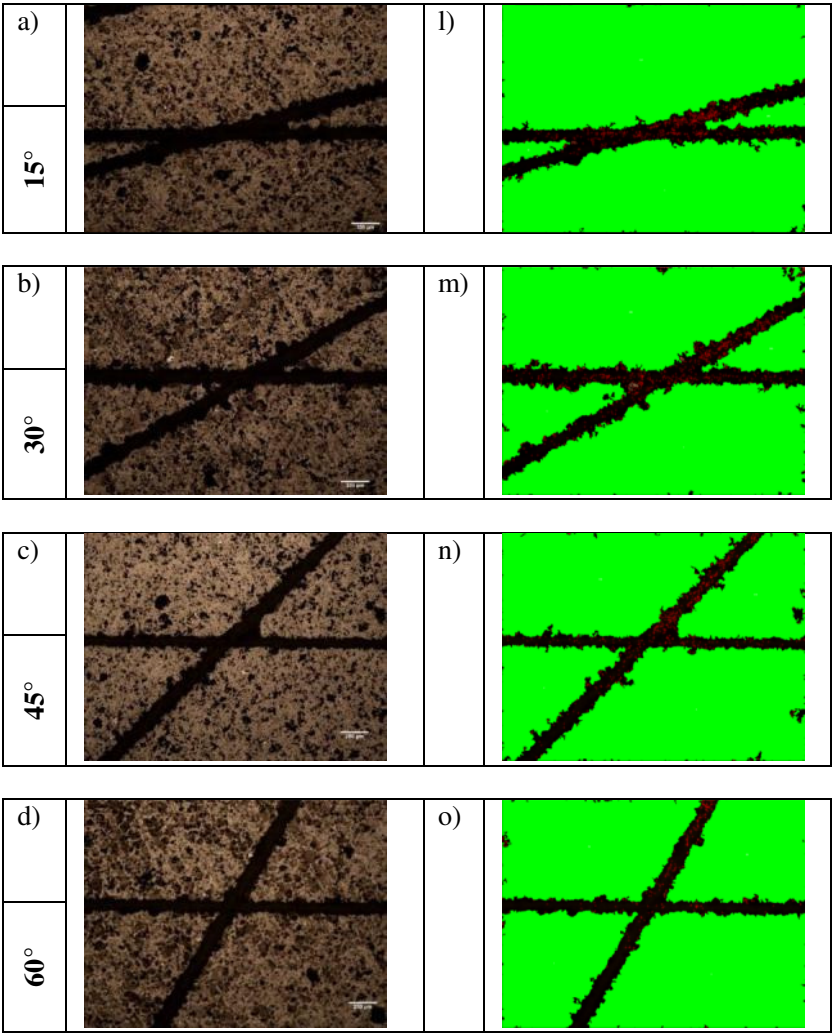
a) até d), imagem por microscopia óptica do riscamento em retificadora plana; e) até h) identificação digital de imagem explicitando em verde área não trabalhada na superfície da placa cerâmica.

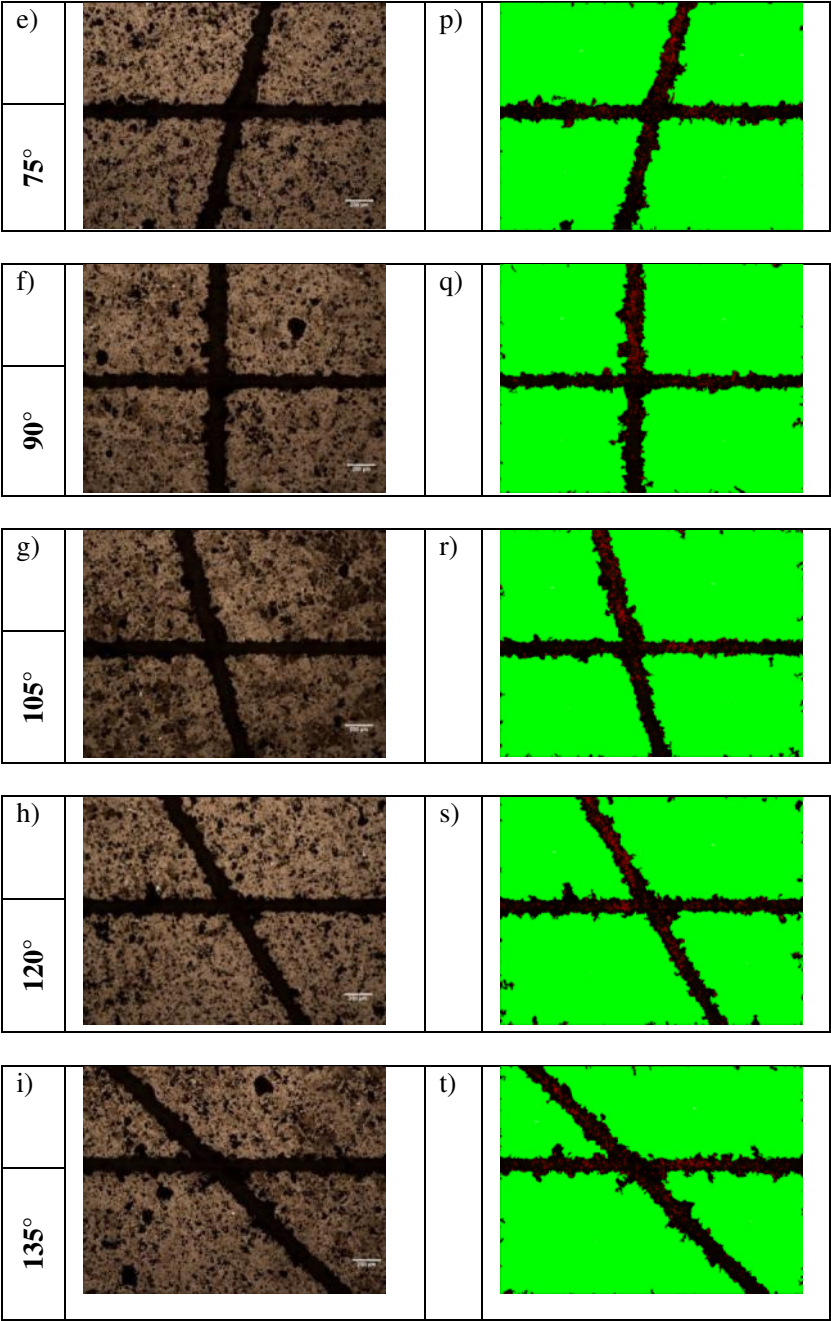
a)		e)	
100μm 15m/s			
b)		f)	
100μm 20m/s			
c)		g)	
200μm 15m/s			

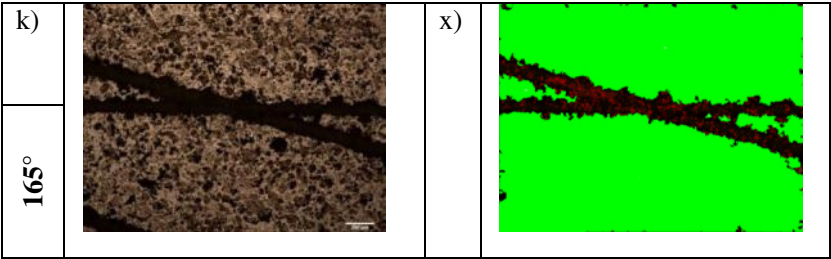
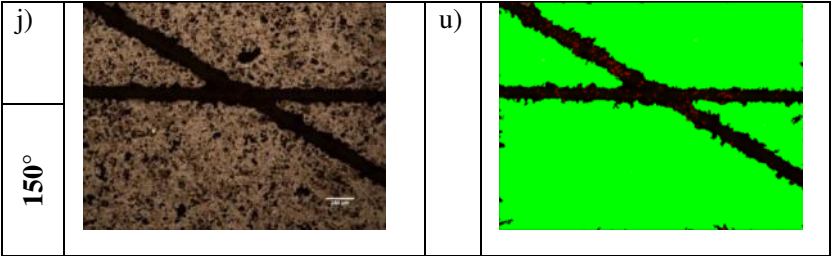
d)		h)	
200µm 20m/s			

APÊNDICE D – Imagens por microscopia óptica e identificação digital para riscamento cruzado

a) até k), imagem por microscopia óptica da zona de cruzamento de riscos; l) até x) identificação digital de imagem explicitando em verde área não trabalhada na superfície da placa cerâmica

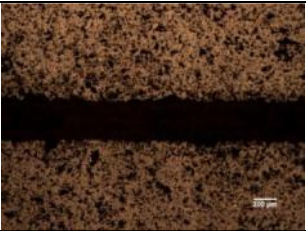
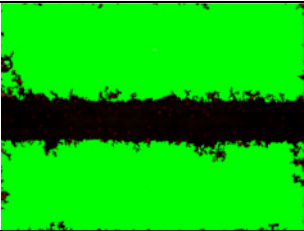
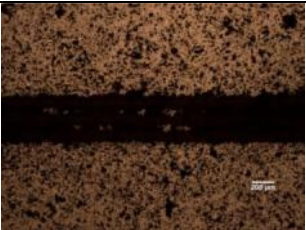
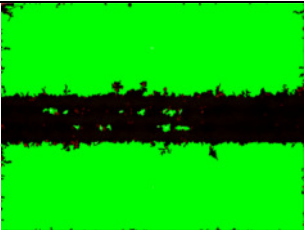
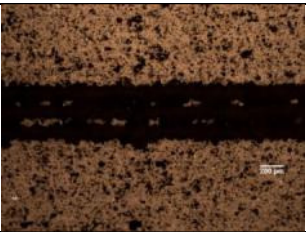
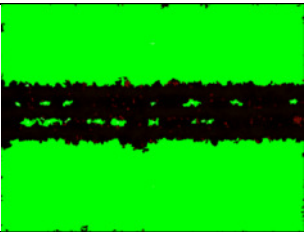
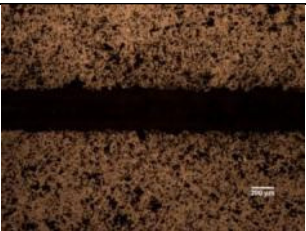
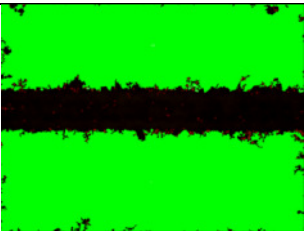



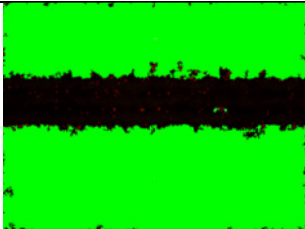
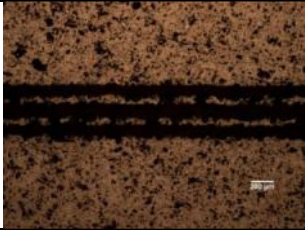
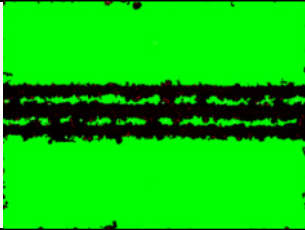

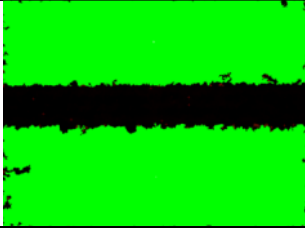

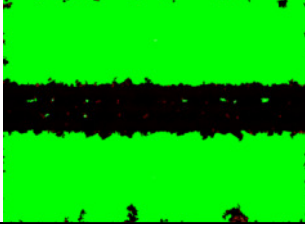

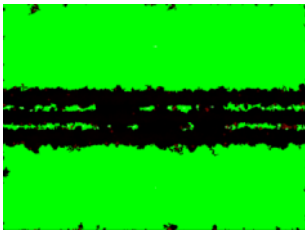




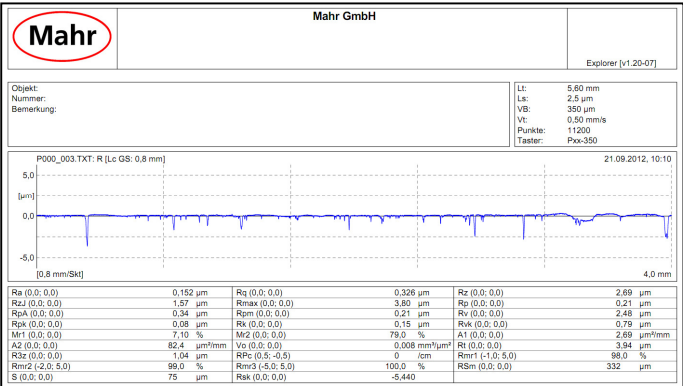
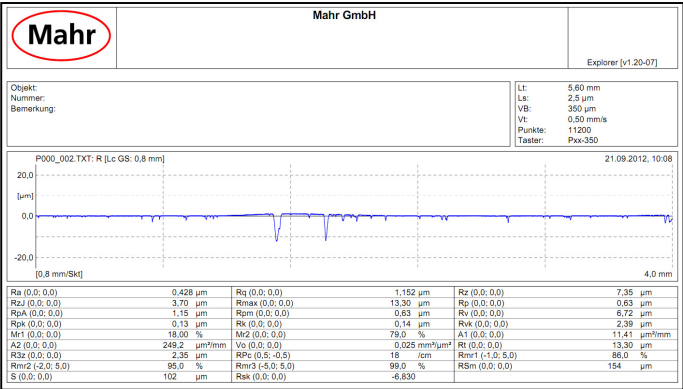
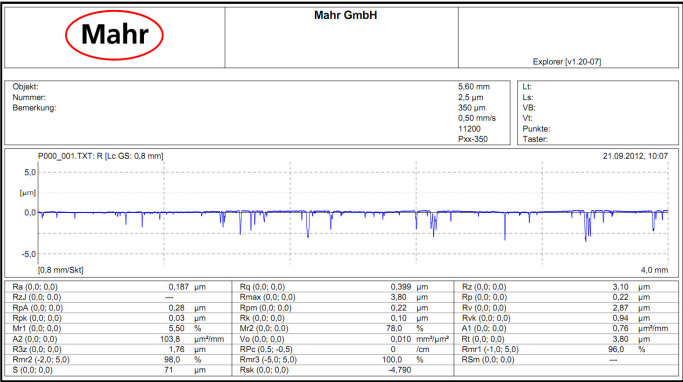
APÊNDICE E – Imagens por microscopia óptica e identificação digital para riscamento paralelo

a) até i), imagem por microscopia óptica da zona de análise do riscamento paralelo; j) até r) identificação digital de imagem explicitando em verde área não trabalhada na superfície da placa cerâmica.

a)	1D-3D-2D 0,8L _R		j)	
b)	1D-3D-2D 1,0L _R		k)	
c)	1D-3D-2D 1,2L _R		l)	
d)	1D-3D-2E 0,8L _R		m)	

e)	1D-3D-2E 1,0L _R		n)	
f)	1D-3D-2E 1,2L _R		o)	
g)	1D-3E-2D 0,8L _R		p)	
h)	1D-3E-2D 1,0L _R		q)	
i)	1D-3E-2D 1,2L _R		r)	

ANEXO A – Relatório de rugosidade média (Ra)



ANEXO B – Relatório de ensaio de densidade aparente



RELATÓRIO DE ENSAIO Nº: 3571/12 24/7/2012 Página 1 de 1

Identificação do Cliente/Solicitante:

Nome: Orestes Estevam Alarcon
Endereço: Universidade Federal de Santa Catarina - Departamento de Engenharia Mecânica - Bairro: Trindade
Cidade: Florianópolis **UF:** SC **CEP:** 88040-900

Informações da Amostra:

Identificação da Amostra: *Porcelanato TU-KL*
 Amostra: *Corpo de Prova*
 Quantidade de Amostra: *1 corpo de prova*
 Forma da amostra: *Corpo de Prova*

Tipo de Amostra: *Não declarado*
 Data do recebimento: *2/7/2012*
 Nº da Requisição do Serviço: *Não declarado*

RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Ensaio finalizados em: 24/7/2012

Resíduo bruto # 325 mesh (Método: Peneiramento / PR-CC-090)	-
Umidade (Método: Gravimetria / PR-CC-087)	-
Imantáveis (Método: Gravimetria / PR-CC-089)	-
Absorção em óleo (Método: Gravimetria / PR-CC-080)	-
Expansão de conformação (Método: Dimensional / PR-CC-086)	-
Retração de secagem (Método: Dimensional / PR-CC-086)	-
Retração de queima (Método: Dimensional / PR-CC-086)	-
Retração total (Método: Dimensional / PR-CC-086)	-
Absorção de água (Método: Gravimetria / PR-CC-078)	-
Coração negro (Método: Análise visual / PR-CC-088)	-
Densidade aparente - Cru (Método: Imersão em mercúrio / PR-CC-083)	-
Densidade aparente - Seco (Método: Imersão em mercúrio / PR-CC-083)	-
Densidade aparente - Queimado (Método: Imersão em mercúrio / PR-CC-083)	2,4 g/cm³
Índice de piroplasticidade (Método: Dimensional / PR-CC-093)	-
Resistência à flexão - Cru (Método: Flexão 3 pontos / PR-CC-085)	-
Resistência à flexão - Seco (Método: Flexão 3 pontos / PR-CC-085)	-
Resistência à flexão - Queimado (Método: Flexão 3 pontos / PR-CC-085)	-
Coefficiente de plasticidade (Método: Pfefferkorn / PR-CC-093)	-
Fusibilidade (Método: Dimensional - Cone de fusão / PR-CC-077)	Altura final Diâmetro final
	Limite líquido (NBR 6459/84)
Plasticidade (Método: Casagrande / PR-CC-092)	Limite plástico (NBR 7180/84)
	Índice de plasticidade (NBR 7180/84)

Observações:

Luyza Bortolotto Teixeira

Aurea Stela Wessling Werncke

Técnico(a) LDCM

Coordenadora LDCM (CRQ 13400213)

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE: Os resultados tem significação respectivo aplicando-se tão somente à amostra enviada. / Não se admite qualquer responsabilidade referente à existência da amostragem e identificação da amostra a menos que esta tenha sido efetuada mediante supervisão do CTMatal.DC. Qualquer menção expressa, as amostras foram selecionadas pelo solicitante. / A reprodução deste relatório só será autorizada na forma de uma reprodução integral. / O CTMatal não se responsabiliza por danos materiais ou morais decorrentes de qualquer uso indevido das informações contidas no presente relatório. / O CTMatal não se beneficia das marcas comerciais que o solicitante tenha podido citar como identificação das amostras submetidas ao estudo. / Os resultados que são obtidos através de cálculos matemáticos são apresentados com valores arredondados. / O cliente possui um prazo máximo de 45 dias, a partir da data de emissão do relatório, para contestar os resultados contidos neste. Sempre será aceita a contestação se a quantidade da amostra entregue, quando da solicitação respeitar a quantidade mínima exigida.

Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais - LDCM

SENAlsc em Criciúma - Centro de Tecnologia em Materiais

Rua General Lauro Sodré, 300 - Bairro Comercial - Cx. Postal 3247 - CEP 88802-330 - Criciúma - SC
Tel.: (48) 3431-7100 - Fax: (48) 3433-0052 - ldcm@sc.senai.br - <http://www.sc.senai.br>

ANEXO C – Relatório de ensaio de densidade real



RELATÓRIO DE ENSAIO Nº: 3570/12 24/7/2012 Página 1 de 1

Identificação do Cliente/Solicitante:

Nome: Orestes Estevam Alarcon
Endereço: Universidade Federal de Santa Catarina - Departamento de Engenharia Mecânica - Bairro: Trindade
Cidade: Florianópolis UF: SC CEP: 88040-900

Informações da Amostra:

Identificação da Amostra: Porcelanato TU-KL
Amostra: Corpo de Prova Tipo de Amostra: Não declarado
Quantidade de Amostra: 1 corpo de prova Data do recebimento: 2/7/2012
Forma da amostra: Corpo de Prova Nº da Requisição do Serviço: Não declarado

RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA

Ensaios finalizados em: 24/7/2012

Umidade (Método: Gravimetria / PR-CC-087)	-
Capacidade de troca catiônica (Método: Volumetria / ASTM C 837-81)	-
Densidade aparente batida de sólidos (Método: Volumetria / ASTM C 110-96a [18])	-
Densidade aparente solta de sólidos (Método: Volumetria / ASTM C 110-96a [17])	-
Densidade de suspensões (Método: Pícnometria / PR-CC-067)	-
Densidade real de sólidos (Método: Pícnometria / PR-CC-063)	2,78 g/cm ³
Viscosidade absoluta (Método: Viscosímetro rotacional / PR-CC-065)	-
Viscosidade aparente (Método: Viscosímetro rotacional)	-
pH (Método: Potenciometria / PR-CC-064)	-
Potencial zeta (Método: Potenciometria / PR-CC-069)	-
Carbonato total expresso em CaCO ₃ (Método: Cálcimetro de Bernard / PR-CC-061)	-
Condutividade (Método: Potenciometria / PR-CC-066)	-
Distribuição de tamanho de partículas	-
(Método: Difração a laser / PR-CC-062)	-
Índice de inchamento (Método: Volumetria / ASTM 5890)	-

Luyza Bortolotto Teixeira
Técnico(a) LDCM

Áurea Stela Wessling Werncke
Coordenadora LDCM (CRQ 13400213)

CLÁUSULAS DE RESPONSABILIDADE: Os resultados têm significação restrita, aplicando-se tão somente à amostra ensaiada. / Não se admite qualquer responsabilidade referente à existência da amostragem e identificação da amostra a menos que esta tenha sido efetuada mediante supervisão do CTCmat/LDCM. Salvo menção expressa, as amostras foram selecionadas pelo solicitante. / A reprodução deste relatório só será autorizada na forma de uma reprodução integral. / O CTCmat não se torna responsável pelo uso que o solicitante, outra pessoa ou entidade venham a dar aos dados ou indicações contidos no presente relatório, em prejuízo ou benefício das marcas comerciais que o solicitante tenha podido citar como identificação das amostras submetidas ao estudo. / Os resultados que são obtidos através de cálculos matemáticos são apresentados com valores arredondados. / O cliente possui um prazo máximo de 45 dias, a partir da data de emissão do relatório, para contestar os resultados contidos neste. Somente será aceita a contestação se a quantidade da amostra entregue, quando da solicitação, respeitar a quantidade mínima para cada ensaio. Após este período, a amostra será descartada.

Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais - LDCM
SENAtsc em Criciúma - Centro de Tecnologia em Materiais
Rua General Lauro Sodré, 300 - Bairro Comercial - Cx. Postal 3247 - CEP 88802-330 - Criciúma - SC
Tel.: (48) 3431-7100 - Fax: (48) 3433-0052 - ldc@sc.senai.br - http://www.sc.senai.br